

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平4-282445

(43) 公開日 平成4年(1992)10月7日

(51) Int.Cl. <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 N 25/72	G	8310-2J		
H 0 1 L 21/66	H	7013-4M		
	Z	7013-4M		

審査請求 有 請求項の数40(全 19 頁)

(21) 出願番号	特願平3-192930	(71) 出願人	590002873 デジタル イクイブメント コーポレイ ション アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01754メイナード メイン ストリート 146
(22) 出願日	平成3年(1991)8月1日	(72) 発明者	エルドン エドワード コックス ジュニア アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01851ローウエル エイ ストリート 59
(31) 優先権主張番号	5 8 2 1 0 2	(74) 代理人	弁理士 中村 稔 (外7名)
(32) 優先日	1990年9月14日		
(33) 優先権主張国	米国 (U S)		

最終頁に続く

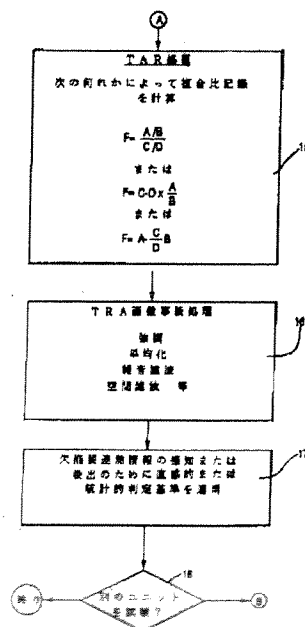
(54) 【発明の名称】 熱比解析を使用する製品欠陥検出方法及び装置

(57) 【要約】 (修正有)

【目的】 “熱比解析法”を使用して製品内の欠陥を検出する方法及び装置を提供する。

【構成】 (1) 周囲温度における参照サンプル周囲温度熱記録を作成し、(2) 熱刺激を参照サンプルに印加して上昇させた複数の温度における参照サンプルの複数の上昇温度熱記録を作成し、(3) 周囲温度熱記録と複数の上昇温度熱記録の1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記(1)～(3)段階を繰り返すことによって試験サンプルの差記録を生成する段階と、参照サンプルと試験サンプルの差記録から少なくとも1つの比記録を生成する段階と、少なくとも1つの比記録を含む複合記録を形成する段階と、複合記録が予測値から統計的に大きい偏差を生じた時に欠陥指示を生成する段階とからなる。

【効果】 集積回路のような電子回路内の隠れた欠陥を検出するのに特に有用である。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1)周囲温度における参照サンプル周囲温度熱記録を作成する副段階と、(2)熱刺激を参照サンプルに印加することを含み、複数の上昇温度における複数の参照サンプル上昇温度熱記録を作成する副段階と、(3)周囲温度熱記録と複数の上昇温度熱記録の1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の上昇温度熱記録の少なくとも別の上昇温度熱記録を包含する参照サンプル第2差記録を作成する副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を生成する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル第1差記録及び少なくとも第2差記録を生成する段階と、参照サンプル差記録及び試験サンプル差記録から少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、少なくとも1つの誘導された比記録を含む複合記録を形成する段階と、複合記録が予測値から統計的に重大な偏差を生じた時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項2】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、温度をコンピュータ制御する請求項1に記載の欠陥検出方法。

【請求項3】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、固定時間間隔で各刺激を印加する請求項1に記載の欠陥検出方法。

【請求項4】 周囲温度熱記録を作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルの熱状態を安定化させることを含む請求項1に記載の欠陥検出方法。

【請求項5】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1)熱刺激のベース値における参照サンプルベース熱記録を作成する副段階と、(2)値を変化させた熱刺激を参照サンプルに印加することを含み、複数の変化値熱刺激における参照サンプルの複数の変化値熱記録を作成する副段階と、(3)ベース値熱記録と複数の変化値熱記録の1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の変化値熱記録の少なくとも別の変化値熱記録を包含する参照サンプル第2差記録を作成する副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を生成する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル第1差記録及び第2差記録を生成する段階と、参照サンプル第1及び第2差記録と試験サンプル第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、この複合比記録が予測値から統計的に重大な偏差を生じた時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項6】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1)周囲温度における参照サンプル周囲温度熱記録を作成する副段階と、(2)電圧を参照サンプルに印加することを含み、印加した複数の電圧によって加熱され上昇した各温度における参照サンプルの複数の上昇温度熱記録を作成する副段階と、(3)周囲温度熱記録と複数の上昇温度熱記録の1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の上昇温度熱記録の少なくとも別の上昇温度熱記録を包含する参照サンプル第2差記録を作成する副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を生成する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル試験記録を生成する段階と、試験サンプル第1及び第2差記録と参照サンプル第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、少なくとも1つの比記録を含む複合記録を形成する段階と、複合記録が予測値から統計的に重大な偏差を生じた時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項7】 熱刺激をサンプルに印加する副段階が、別の熱刺激を印加する時間とは異なる時間に亘って熱刺激を印加する請求項1に記載の欠陥検出方法。

【請求項8】 複数の変化値熱記録を作成する副段階が、刺激値をコンピュータ制御する請求項5に記載の欠陥検出方法。

【請求項9】 複数の変化値熱記録を作成する副段階が、刺激を最初に印加した後に安定化期間を置くことを含む請求項5に記載の欠陥検出方法。

【請求項10】 ベース熱記録を作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルを安定化させることを含む請求項5に記載の欠陥検出方法。

【請求項11】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、電圧をコンピュータ制御する請求項6に記載の欠陥検出方法。

【請求項12】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、電圧を最初に印加した後に温度安定化期間を置くことを含む請求項6に記載の欠陥検出方法。

【請求項13】 周囲温度熱記録を作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルを安定化させることを含む請求項6に記載の欠陥検出方法。

【請求項14】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、各期間をコンピュータ制御する請求項7に記載の欠陥検出方法。

【請求項15】 複数の上昇温度熱記録を作成する副段階が、上昇温度に到達した後に温度安定化期間を置くことを含む請求項7に記載の欠陥検出方法。

【請求項16】 サンプルを周囲温度に安定化させる副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことを含む請求項7に記載の欠陥検出方法。

【請求項17】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する装置であって、欠陥を有していない参照サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外データと、試験サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外データとを記録する装置と、参照サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外データから参照サンプル差記録を形成し、試験サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外データから試験サンプル差記録を形成する装置と、参照サンプル差記録と試験サンプル差記録とからなる4つの差記録の2つから少なくとも1つの比を誘導する装置と、この比を全ての差記録を包含する複合記録に変換する装置と、複合記録が予測値から統計的に重大な偏差を生じた時に欠陥指示を生成する装置とを具備することを特徴とする装置。

【請求項18】 比記録を強調して潜在的な偽欠陥指示を除去する装置をも具備する請求項17に記載の装置。

【請求項19】 比記録から斑点雑音を除去する装置をも具備する請求項18に記載の装置。

【請求項20】 比記録を誘導する前に、熱記録、または差記録を前処理する装置をも具備する請求項19に記載の装置。

【請求項21】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1) 周囲温度における参照サンプル周囲温度サーモグラフを作成する副段階と、(2) 熱刺激を参照サンプルに印加することを含み、複数の上昇温度における参照サンプルの複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階と、(3) 周囲温度サーモグラフと複数の上昇温度サーモグラフの1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の上昇温度サーモグラフの少なくとも別の1つの上昇温度サーモグラフを包含する参照サンプル第2差記録とを作成する(第1及び第2の差記録は各々画像関連アレイ内の複数の画像型データ点からなる)副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を生成する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル第1差記録及び第2差記録を生成する段階と、参照サンプル第1及び第2差記録と試験サンプル第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から、少なくとも1つの差記録内のデータ点に対応するデータ点を含む少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、複合記録が、周囲領域に対する平均コントラストより実質的に大きい少なくとも1つの離散した領域を有する時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項22】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、熱刺激をコンピュータ制御する請求項21

に記載の欠陥検出方法。

【請求項23】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、固定時間間隔で各刺激を印加する請求項21に記載の欠陥検出方法。

【請求項24】 周囲温度サーモグラフを作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルの熱状態を安定化させることを含む請求項21に記載の欠陥検出方法。

【請求項25】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1) 熱刺激のベース値における参照サンプルのベースサーモグラフを作成する副段階と、(2) 値を変化させた熱刺激を参照サンプルに印加することを含み、複数の変化値熱刺激における参照サンプルの複数の変化値サーモグラフを作成する副段階と、(3) ベース値サーモグラフと複数の上昇値サーモグラフの1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の上昇値サーモグラフの少なくとも別の1つの上昇値サーモグラフを包含する参照サンプル第2差記録とを作成する(第1及び第2の差記録は各々画像関連アレイ内の複数の画像型データ点からなる)副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を確立する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル第1差記録及び第2差記録を生成する段階と、参照サンプル第1及び第2差記録と試験サンプル第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から、少なくとも1つの差記録内のデータ点に対応するデータ点を含む少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、少なくとも1つの誘導された比記録を含む複合記録を形成する段階と、複合記録が、周囲領域に対する平均コントラストより実質的に大きい少なくとも1つの離散した領域を有する時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項26】 製品の試験サンプル内の欠陥を検出する方法であって、(1) 周囲温度における参照サンプルの周囲温度サーモグラフを作成する副段階と、(2) 電圧を参照サンプルに印加することを含み、印加した複数の電圧によって加熱され上昇した各温度における参照サンプルの複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階、及び(3) 周囲温度サーモグラフと複数の上昇温度サーモグラフの1つとから参照サンプル第1差記録を作成し、複数の上昇温度サーモグラフの少なくとも別の1つの上昇温度サーモグラフを包含する参照サンプル第2差記録を作成する(第1及び第2の差記録は各々画像関連アレイ内の複数の画像型データ点からなる)副段階とからなる欠陥を有していない製品の少なくとも1つの参照サンプルの参照記録を確立する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて上記副段階(1)～(3)を繰り返すことによって、試験サンプル試験記録を生成する段階

と、試験サンプル第1及び第2差記録と参照サンプル第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から、少なくとも1つの差記録内のデータ点に対応するデータ点を含む少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、少なくとも1つの比記録を含む複合記録を形成する段階と、複合記録が、周囲領域に対する平均コントラストより実質的に大きい少なくとも1つの離散した領域を有する時に欠陥指示を生成する段階とを具備することを特徴とする欠陥検出方法。

【請求項27】 熱刺激をサンプルに印加する副段階が、別の熱刺激を印加する時間とは異なる時間に互って熱刺激を印加する請求項21に記載の欠陥検出方法。

【請求項28】 複数の変化値サーモグラフを作成する副段階が、刺激の値をコンピュータ制御する請求項25に記載の欠陥検出方法。

【請求項29】 複数の変化値サーモグラフを作成する副段階が、刺激を最初に印加した後安定化期間を置くことを含む請求項25に記載の欠陥検出方法。

【請求項30】 ベースサーモグラフを作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度を超えない実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルを安定化させることを含む請求項25に記載の欠陥検出方法。

【請求項31】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、電圧をコンピュータ制御する請求項26に記載の欠陥検出方法。

【請求項32】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、電圧を最初に印加した後温度安定化期間を置くことを含む請求項26に記載の欠陥検出方法。

【請求項33】 周囲温度サーモグラフを作成する副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度を超えない実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことによってサンプルを周囲温度に安定化させることを含む請求項26に記載の欠陥検出方法。

【請求項34】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、各期間をコンピュータ制御する請求項27に記載の欠陥検出方法。

【請求項35】 複数の上昇温度サーモグラフを作成する副段階が、上昇温度に到達した後温度安定化期間を置くことを含む請求項27に記載の欠陥検出方法。

【請求項36】 サンプルを周囲温度に安定化させる副段階が、圧縮ガス源からのガスを周囲温度にほぼ等しい実効温度でサンプルの周囲に急速に流すことを含む請求項27に記載の欠陥検出方法。

【請求項37】 製品の試験サンプル内の欠陥を熱的に検出する装置であって、欠陥を有していない参照サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外画像と、試験サンプルの周囲温度及び上昇温度における赤外画像とを形成する（各画像は複数の画像データ点からなる）装置と、参照サンプルの周囲温度及び上昇温度における画像

から参照サンプル差記録を形成し、試験サンプルの周囲温度及び上昇温度における画像から試験サンプル差記録を形成する装置と、参照サンプル差記録と試験サンプル差記録とからなる4つの差記録の2つから少なくとも1つの比記録を形成する装置と、この比記録を全ての差記録を包含する複合記録に変換する装置と、複合記録が、周囲領域に対する平均コントラストより実質的に大きい少なくとも1つの離散した領域を有する時に欠陥指示を生成する装置とを具備することを特徴とする装置。

【請求項38】 比記録を強調して潜在的な偽欠陥指示を除去する装置をも具備する請求項37に記載の装置。

【請求項39】 比記録から斑点雑音を除去する装置をも具備する請求項38に記載の装置。

【請求項40】 比記録を誘導する前に、サーモグラフ、または差記録を前処理する装置をも具備する請求項39に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、熱解析を使用する製品欠陥検出に関する。

【0002】

【発明の背景】 優れた品質の得るために、部品及び製品の隠れた欠陥を早期に発見することに製造業者の関心が高まって来ている。即ち、不確定な時間に互って潜在する、つまり発見されないままとなりがちな欠陥の早期発見に対するニーズが存在している。

【0003】 近年これらの欠陥を発見する方法として、サーモグラフィ（熱像法）または熱解析が注目を集めている。全ての物体は、温度に依存してある強さと“色”の熱放射で“輝く”。室温においては、この“色”は赤外線として知られる範囲内にあり、裸眼では見ることができない。火中の鉄のように、高温では物体は見えるように光る。この特性を使用して、如何なる種類の接触も必要とせず、表面の温度を測定することができる。幾つかの型の装置は何れも、この温度情報をその場面内の温度を表す白黒またはカラー画像に変換することができる。この装置を“サーマルイメージャ”と呼び、電子組立体の不可視特性の研究に使用して欠陥デバイスの探知を期待できる。

【0004】 製品の加熱効果のパターン（例えば赤外光輝のパターン）が、潜在欠陥によって影響され得ることは長い間知られていたが、若干の型の欠陥は加熱効果容易に検出することができなかった。具体的に言えば、バイポーラ半導体回路において、従来の熱解析（サーモグラフィ）技術は欠陥を探知するのに、若干の限定された状況を除いて、周縁のみに有効であった。

【0005】 このような装置を用いた解析技術は、幾つかの画像の少なくとも1つのために物体の温度を上昇させることが屢々であった。異なる条件下で得られた画像を比較して、画像から正常なものを除去し、欠陥に関係



のある画像特色のみを残す。半導体回路または成分の場合には、異なる条件は正常給電状態及び正常非給電状態であり得る。

【0006】これらの従来の解析技術の1つは画像減算として知られている。要するに、この技術においては、製品の良質サンプルである参照サンプルから赤外放射を表す値の正規アレイからなる画像を入手し、製品の未知品質のサンプルである試験サンプルから入手した類似の画像から差し引く。この目的は、正常であることが知られている特色を差画像から除去し、差画像内の残りが製品の欠陥を表すとする見込みを増加させることである。従来の熱解析技術は、1つの形状で、または別の形状で画像減算を使用している。例えば、1989年3月のTEST AND MEASUREMENT WORLD の100、111、112頁に所載のC. G. Masi の論文「Finding Board Faults With Thermal Imaging」を参照されたい。回路基板に関して記述されているこの論文の画像減算技術は、基板を既知の熱状態にして（例えば、基板全体を22°C）開始される。試験員は所与の電力を基板に供給し、基板が動作温度まで熱せられる際のサーモグラムの変化を監視する。

【0007】これらの製品に関して画像減算サーモグラフィに使用されている基本現象は、1988年5月のTEST AND MEASUREMENT WORLD に記載のC. G. Masi の論文「What Can Thermal Imaging Do For You ?」に述べられているように、電流輸送トレース及び成分の抵抗加熱からの黒体放射である。しかし、画像減算サーモグラフィは、これらの製品が制御された熱変化を受けるような非電流輸送製品にも適用できることは周知である。

【0008】画像減算による熱変化の監視は、無欠陥製品の熱変化が、欠陥製品の熱変化とは異なるべきであるという前提に基づいている。即ち、既知の無欠陥製品（サンプル）のサーモグラムの被試験製品（もしくはサンプル）のサーモグラムから差し引いた時、差（もしあれば）が欠陥を表すことを期待しているのである。反対にサンプル内に隠れた欠陥が存在すれば、その欠陥が無欠陥サンプルのサーモグラムとは異なるサーモグラムを発生するであろうことを期待している。従来技術が成功した最も顕著な例は、比較的少ない熱を発生する製品に関してであった。しかし遥かに大きい熱を発生するトランジスタ・トランジスタ論理回路のような製品の診断試験では、従来技術はぎりぎりの成功を見たに過ぎなかった。無欠陥（正常）サンプルの加熱のばらつきが、微妙な欠陥を有するサンプルが発生する加熱がもたらす効果よりも遥かに大きくなり得ることが問題なのである。この傾向が、従来の画像減算技術によるこのような欠陥の検出を、不可能ではないにしても、困難ならしめていた。

【0009】

【発明の概要】本発明の目的は、画像減算サーモグラフィの限界を打破することである。参照サンプルのサーモ

グラムと、欠陥を表していると考えられる試験サンプルのサーモグラムとの差を、欠陥には関係がないと考えられる差に対して強調することが望ましい。

【0010】本発明は、先ず、良好であることが知られている試験済製品（“参照サンプル”）に、次いで同一製品の試験サンプルに適用される2つの異なる非平衡熱刺激に対するサーモグラフィック応答に関係付けられた変数の比を求めることによって、欠陥に対してより鋭敏な解析を達成できるという認識に基づいている。ここで使用する“熱刺激”なる語は、製品のサンプルに適用される時、始めは必ずしも熱ではなくとも最終的には製品の温度に変化をもたらすような刺激のことである。各サンプル毎の安定したベースレベル（もしくは平衡）サーモグラムも変数の決定に包含される。

【0011】参照サンプルと試験サンプルとに関係する4つの差記録が生成され、それらから少なくとも1つの比記録が誘導される。この比記録と未使用差記録とから複合記録が形成される。この複合記録が予測した値から統計的に重大な偏差を生じた場合に欠陥指示が生成される。この欠陥検出のための統計基準に関しては後述する。

【0012】本発明の技術を、「熱比解析法（TRA）」と名付けた。本発明は、参照サンプルと試験サンプルとから得た複数の熱差記録から少なくとも1つの熱比パターンを求め、少なくとも1つの熱比パターンを含む複合記録を形成する方法及び試験装置を提供する。これらのサンプルは同一部品または製品の類似サンプルであるから、それらを“参照サンプル”及び“試験サンプル”と名付ける。

【0013】本発明の重要な特色によれば、製造されたデバイスの試験サンプル内の欠陥を検出する方法が提供され、本方法は、（1）ベース値熱刺激における参照サンプルのベース熱記録を作成する副段階と、（2）ベース値から変化させた値の熱刺激を参照サンプルに与えることを含み、複数の変化値熱刺激における参照サンプルの複数の変化値熱記録を作成する副段階と、（3）ベース値熱記録と複数の変化値熱記録の1つとから第1差記録と、少なくとも別の複数の変化値熱記録が関連している第2差記録を作成する（第1及び第2差記録は各々画像関連アレイ内の複数のデータ点からなる）副段階と、からなり、デバイスの少なくとも1つの参照サンプルに関する参照記録を確立する段階と、参照サンプルを試験サンプルに置換えて副段階（1）-（3）を繰り返すことによって試験サンプルの試験記録を生成する段階と、試験サンプルの第1及び第2差記録と、参照サンプルの第1及び第2差記録とからなる4つの差記録から少なくとも1つの比記録を誘導する段階と、少なくとも1つの誘導された比記録を含む複合記録を形成する段階と、この複合記録が予測値から統計的に重大な偏差を生じた場合、欠陥表示を生成する段階とを具備する。

【0014】好ましい実施例においては、第1及び第2サーモグラフを発生させる段階において変化させる熱刺激は、サンプル内に加熱を生じさせるように印加する第1及び第2の振幅の電圧であり、ベースレベルサーモグラフは周囲温度サーモグラフである。1実施例は集積した回路基板上の電子成分に直接的に適用可能であり、画像強調技術と呼ばれることもあるマスキング及びフィルタリング技術を使用することによって、及びロボット式操作制御を使用することによって、半導体集積回路、特にセラミックサブストレートまたは印刷回路基板上に取りつけられたパッケージされた集積回路まで拡張できる。

【0015】本発明の別の実施例においては、熱刺激は、振幅ではなく持続時間を変化させた電圧である。もし半導体成分または半導体回路のような電子成分または回路を、コンピュータまたはタイミングプログラムによる制御を意図した動作モードに関係付けた実際の条件の下で試験するのであれば、この実施例は特に有利である。実際に、熱比解析と同時に、慎重にタイミングを考慮した動作試験を実施することを考えることは確かに合理的である。

【0016】本発明の原理は、サーモグラフ的に試験できる全ての製品に拡張される。電流を流さない製品の場合、使用される1つの刺激としてマイクロ波放射を考慮することができる。このようにすればこれらの製品、より特定的にはこれらの製品のサンプルを、特許請求の範囲内の方法及び装置によって試験することができる。以下に添付図面に基いて本発明の好ましい実施例を説明するが、この説明から本発明の原理が明白に理解されよう。

#### 【0017】

【実施例】図1乃至図5に好ましい方法の例の流れ図を示す。本発明の方法は、所与の製品の類似サンプルの間で予測される熱変動を補償することによって、画像減算技術の限界を打破する。本発明は、異なる熱刺激の下で類似サンプルの加熱の比が一定であることを前提としている。もしサンプル内に機能的欠陥または他の異常が存在すれば、少なくとも1つの熱刺激に対して予測される値からずれた熱応答が得られることが期待され、そして実際にこの期待通りであった。これは、データ点の画像関連アレイ内の特定データ点におけるそのサンプルの加熱の比を変化させ、従って実際の欠陥、欠陥関連現象、または潜在欠陥の何れかの位置としてそのデータ点を指示する。この応用の場合には、欠陥は製品の受け入れ可能な品質または特性からの偏差である。

【0018】同一サンプルから、または参照サンプル及び試験サンプルから画像差の2つのアレイの比が誘導されると、通常熱変動は打ち消される。この技術を完成させるために、測定値は、参照サンプル及び試験サンプルの（各アレイ内の対応データ点の）他の2つの画像差の

アレイを含む複合記録に形成される。例えば測定の複合集合を形成するために、異なる比記録を誘導し、これらの比記録の比を取って不正確な温度プロファイルから正しいものを見分ける手段とすることができる。一般的には、複合記録内に異常領域または異常データが現れると欠陥であるとされる。

【0019】現在では、2つの型の刺激が本発明によるTRAに有用であることが認められている。最初の、そして最も簡単な刺激は、サンプルに給電するための電圧を変化させる（典型的にはサンプルに指定されている最高電圧と最低電圧を使用）ことである。サンプルは独立サンプルであっても、またはより大きい機能群の一部であってもよい。サンプルは完全に静的に試験することができ、またもし熱比解析のタイミング制約と両立可能であるならば予測される動作の完全なシミュレーションによって試験することもできる。しかし、静的試験はシミュレーションと加熱効果との考え得る相互作用（即ちシミュレーション中に欠陥によって通常判断ループから分岐するソフトウェアによる動作の変更）を排除する。試験のシミュレーションの型は、故意に、2つのソフトウェアルーチンまたはクロック動作対非クロック動作によって導入される加熱効果に依存させる。実際にこの型の試験は単にサンプルの動作をシミュレートするように設計することができ、またサンプルに及ぼす普通の信号の持続時間ストレスの効果を（各刺激の振幅ではなく主として持続時間を変えることによって）シミュレートすることさえできる。

【0020】製品の異なる無欠陥サンプル間に見られる熱変動は、サンプル自体の製造及び設計公差が大きな原因である。電子回路の場合、この変動は印加電圧に対して線形及び非線形の両抵抗成分を有し、また印加される動的刺激にもさらされる。周囲温度からの温度上昇の量は、消散電力×定数（集積回路の場合はそのパッケージングに起因する）に線形に比例する。このパッケージングは回路毎に変化し得るものであるが、外部刺激の関数ではない。従って観測されるであろうと予測される温度上昇は、内部的にはパッケージングと線形及び非線形抵抗との関数であり、外部的には印加電圧と動的刺激（即ちソフトウェア）との関数である。

【0021】欠陥は電子サンプルの内部抵抗構造の変化として証明することができるが、標準の画像減算法では通常の変動から識別することは困難である。2つの温度上昇間の比を取ると製品の特性熱サイン、即ち製品内に1つの点を得られることは、従来のサーモグラフィ技術では理解されていない。欠陥は、外部変数の関数となる（それらの通常の対応変数によって表される関数とは異なる）強い傾向を有している。例えば、製品の複数の正常サンプルの非線形抵抗は通常は同じ非線形関係を有しており、線形定数だけが異なる。もし2つの異なる電圧で電力をサンプルに印加して刺激し、本発明の爾後の

諸段階を使用すれば、任意の対応データ点において測定される2つの温度は、(1)印加電圧の比の関数(比の $\alpha$ 乗、但し $\alpha$ は0に等しくない)として表される非線形抵抗、及び(2)2つの電圧の比の自乗によって関係付けられる。均等に分布している線形関係は消去される。

【0022】2つの異なる電圧レベルに対する周囲温度からの温度上昇の比は、同一製品では全てのサンプルで一定となる筈である。パッケージングが極端に異なる場合を除いて、パッケージの熱定数でさえも計算から消去される。従って同一製品の参照サンプル及び試験サンプ  
10 ルを測定し、以下に説明するように少なくとも1つの比を適切に含む解析諸段階と、例えばこれらの比の比を取る諸段階とを遂行することによって、予測される変動を実質的に打ち消し乃至は排除することができる。以下に数学的に示すようにしてこれを遂行すると、画像関連デー

$$P = E \times I(E)$$

であるから、

$$\Delta T = C_p \times E \times I(E)$$

また

$$I(E) = E/R(E)$$

であるから、

$$\Delta T = C_p \times E^{**2}/R(E) \quad (**は累乗を表す、以下同じ) \quad (4)$$

抵抗はその逆数であるコンダクタンス(導電率)Gに置換できるから、

$$\Delta T = C_p \times E^{**2} \times G(E) \quad (5)$$

コンダクタンスは、線形項及び非線形項を有するEの

$$G(E) = \beta \times E^{**\alpha}$$

$$\Delta T = C_p \times E^{**2} \times \beta \times E^{**\alpha} \quad (7)$$

この関係は $\alpha$ の0からの偏差の程度に依存する程度に非線形である。

\*タ点の値に関する式の若干の項は全て(電圧の自乗に関する項さえも)消去される。残されるのは、参照サンプルと試験サンプルとがそれらの“非線形”特性の中で実質的な差を呈したピクセル(画素、得られるアレイ内のデータ点)だけが強調された画像である。

【0023】熱比解析のために2レベルの電圧刺激を使用する本発明による上述の原理を以下に数学的に説明する。サンプルの周囲温度からの温度上昇 $\Delta T$ は、電力消散(Pd)と、サンプルのパッケージング及びヒートシンキングに関係づけられた定数( $C_p$ )との積と等価である。即ち

$$\Delta T = T(E) - T_a = C_p \times P_d(E),$$

但し $T_a$ は周囲温度、 $T(E)$ は印加電圧Eによって生ずる上昇温度である。

【0024】

$$(1)$$

$$(2)$$

$$(3)$$

$$(4)$$

$$(5)$$

$$(6)$$

$$(7)$$

関数としてモデル化することができる。即ち、

※【0025】画像を2つの電圧レベルで取り、それらから温度差比T2:1を求めれば、

$$T2:1 = (\Delta T2 / \Delta T1)$$

$$= (C_p \times E2^{**2} \times \beta \times E2^{**\alpha}) /$$

$$(C_p \times E1^{**2} \times \beta \times E1^{**\alpha}) \quad (8)$$

$$T2:1 = (E2/E1)^{**2} \times (E2/E1)^{**\alpha} \quad (9)$$

この点で不要項は既に消去されている。

★Trsであり、また試験サンプルの比がTtsであるものと

【0026】参照サンプルが画像化され、その温度比が★

する。これらの比の比を取ると、

$$Tts\ 2:1 / Trs\ 2:1 = (E2/E1)^{**} (\alpha_{ts} - \alpha_{rs}) \quad (10)$$

即ち、得られる画像は、印加電圧と、内部抵抗の非線形成分の差だけの関数である。つまり、検出できる差は、 $\alpha_{ts}$ が $\alpha_{rs}$ に等しくない場合に(一般的には $\alpha$ が0に等しくない場合には $\alpha_{ts}$ は $\alpha_{rs}$ に等しくない)データ  
40 点のアレイに存在することになる。もし非線形抵抗が等しければ、結果は1になる。このように小さいが容易に変化しやすい非線形項が、消去された大きい線形変動によって圧倒されることがないため、これは非線形欠陥の感受性の高い尺度となり得る。

【0027】また、電圧を一定に保ち、普通はソフトウェアを変えたり、またはクロックをオンオフすることに★

$$(A/B) / (C/D) = 1$$

$$A/B = C/D, \text{または} A/C = B/D$$

$$(11)$$

$$(12)$$

これらは両サンプルのT<sub>s</sub>、T<sub>1</sub>及びT<sub>2</sub>を測定し、

適切な減算を遂行することによって直接的に求めること



ができる(例えば、参照サンプルの場合 $D=T2-T1$ )。

【0029】欠陥サンプルの場合、元の温度成分(A、B、C及びD)は無欠陥サンプルに関するシナリオと同一であると考えることができる。しかし、図7に示すように欠陥によって付加される温度成分(F)のために直接測定することはできない。図示のように、欠陥温度成分Fが2つのまたは何れかの熱刺激の関数であることは明白である。

【0030】さらなる解析を遂行しなくとも、3つの比(先ず式(12)の何れかに従って2つの比を求め、次いで式(11)によって示唆されているように各データ点毎に比の比を取る)の使用を含む熱比解析を遂行することが可能である。実際的に言えば、上述のようにし\*

$$C=D \times A/B$$

$$C'=C+F$$

$$F=C'-C=C'-D \times A/B$$

式(15)は、式(11)の多くの近似代数変換の1つである。

【0032】実際に、式(11)の代数変換である式(15)は、TRAを、類似成分間の予測可能な変動を補償するように正規化された特定の型の画像減算と見做し得ることを示唆している。これは本発明の特に有用な実例である。TRAの別の方法である近似形は、その最も簡単な形状として参照サンプルと試験サンプルの対照的な差記録から1つの比だけを求める必要がある。但し、この方法は乗算と他の差記録を含む最終的な、即ち“正規化された”差を求めることをいとわないことが条件である。

【0033】上述した解析はTRAの単純さを明らかにしており、TRA以外では除去されなかった画像内の多くのアーチファクト(人工生成物)を、比を使用するTRAが何故除去するのかを示している。式(10)及び(11)から、欠陥が存在しない場合には、測定した熱値から計算した比の比が1に等しいことは明白である。望むならば、適用可能な何等かの代数変換によって熱比関係を別の形で表すこともできる。式(15)は、無欠陥に対応する値が1ではなく0となるように熱情報に影響を与える変換の例である。この形は、計算された値が無欠陥レベルに対して対称的になることが長所でもある。

【0034】何れの場合も、全ての測定には統計的法則に従うある自然変動、即ち分散が存在する。この理由からTRA計算の結果は正確に1(式(11)の場合)、または0(式(15)の場合)にはならない。その替わりにデータ値は中心値を中心としてランダムに分布、即ち分散する。この分布は中心に強く重み付けられ、環境要因とTRAシステム内の成分の質とに依存するある特徴的な広がり(即ち標準偏差)を有している。画像として表示された時、これは雑音のない均質な背景の中にあ

\*て求めた4つの差記録を入手すれば、基本的には以下のようにしてTRAを遂行することができる。即ち、参照サンプルの第1及び第2差記録と試験サンプルの第1及び第2差記録とから、第1差記録同士の比及び第2差記録同士の比を取ってこれらの比の比を取るか、または参照サンプルの差記録同士の比及び試験差記録同士の比を取ってこれらの比の比を取ることによって、第1及び第2比記録を誘導する。

【0031】FがCの値だけを変更するものと仮定することによって、Fを予測することができる。(類似の効果を得るために他の近似仮定を行うこともできる。)上式を並べ換え、測定したA、B及びDの値に基づいてCを求め、このCを試験サンプルの $T2-T1$ について測定した値( $C'$ )から差し引く。即ち、

$$(13)$$

$$(14)$$

$$(15)$$

る程度の雑音、または非均質性として現れる。

【0035】欠陥に対応するTRA値は中心値(使用する式に依存して1または0)に接近しない傾向がある。欠陥関連熱情報検出の方法は、簡単な統計的試験である。測定データの広がりまたは散乱の値は計算される(標準偏差が良い尺度である)。この広がり試験フィールド全体を包含してもよいし、またはその局部領域だけを包含していてもよい。この広がり値の倍数に基づいてしきい値が設定される。普通は統計的に標準偏差(“シグマ”)の2乃至3倍の倍数が取られ、次いでこのしきい値は中心値の上下に設定される。もし倍数に2を使用すれば、通常雑音の95%が2つのしきい値の間に入ることになる。倍数が3であれば、通常雑音の99%が限界内に入る。これらの範囲の1つに入らないTRA値があれば、それは障害を表しているものと考えられる。

【0036】欠陥指示の確実性は2つの理由から偏らせることができる。第1に、しきい値を遥かに超えた値は普通、わずかに超えた値よりも強い欠陥指示であると考えられるからである。第2に、TRA値を用いてある画像を形成させた時殆どの実成分は、少なくとも幾つかの明確な隣接熱比解析値が所与の成分に一致するであろう程十分に大きいからである。欠陥指示の不確実性は、しきい値を超えるTRA画像値の数に逆比例する。従って一般的には、欠陥に対して所与の確実性を維持するためには、ある成分に一致する画像点(この成分においては総体的な背景に対してこれらの画像点が十分なコントラストを有する)が多い程、しきい値を下げることができる。任意の大きさ(画像値の数で表した)の成分に対して、良品であるデバイスを誤って欠陥品と指示したり、または欠陥デバイスを検出しなかったりする確率を固定されたものに維持する動的試験しきい値を設定することができる。これらは雑音の中から所望の特色を演出する

ための標準的な統計的方法である。

【0037】この点まで欠陥検出を向上させることが、TRAデータ値で画像を構成させる本発明の好ましい実施例の関心事であった。この場合、上述の欠陥検出の正規の統計的手法を放棄して、画像を視的に検査するより直感的な手法を選択することができる。簡単にいえば、表示の強さ（または色）が残余の画像から重大な（即ち平均より大きい）コントラストによって目立つ点または領域として欠陥を表すのである。

【0038】しかし本発明は画像応用のみに限定されるものではない。本発明の実施例は、単一の点（通常はユニット上の個々の成分に一致する点）だけにおいて離散した温度測定を行うことが可能である。明らかにこれらの測定は互いに空間的に関係なく、またデータ値の画像アレイを形成していない。この場合、正常熱値から欠陥関連熱値を識別するためには、正規の統計的解析が必要\*

$$F = C' - D \times (A + \epsilon) / (B + \epsilon) \quad (16)$$

しかしこれを使用する前に、先ず誤差を導入する変数について考えよう。任意の温度測定Tの不確実性 $\partial$ Tは、イメージャの最小温度解像力Tr（通常は $\pm 20$   $\partial T = Tr + Tse$

である。

【0040】Tseを評価するために、温度安定化関数をモデル化しなければならない。これは、対応付けられた時定数 $\tau$ を有する指数で粗に近似され、最終的にはある★

$$Ts(\tau, t) = T_{max} \times (1 - e^{*-t/\tau}) \quad (18)$$

Tsの不確実性を $\tau$ 及びtの値及び不確実性で表せば、

$$Tse = Ts(\tau + \partial\tau, t + \partial t) - Ts(\tau, t) \quad (19)$$

$$Tse = T_{max} \times \{ e^{*-(\tau + \partial\tau)} - e^{*-(\tau)} \} \quad (20)$$

因にTRA式のA、B、C'及びDの各項は実際には、T1またはT2の何れかと元の周囲温度Taとの差である。従ってこれらの各項毎の正味の累積不確実性は2回目の測定温度Tm（T1またはT2の何れか）と元★

$$\partial A = \partial B = \partial C' = \partial D = \partial T_m + \partial Ta \quad (21)$$

しかし、

$$\partial T_m = \partial Ta = Tr + Tse \quad (22)$$

であるから、

$$\partial A = \partial B = \partial C' = \partial D = 2 \times Tr + 2 \times Tse \quad (23)$$

これは、正常（無誤差）項が減算される場合でさえも、誤差項は常に加算されるためである。誤差項加算の正味の効果は、0と $\pm 3\sigma$ 点との平均を全ての誤差項の±和に等しくして、正常分布関数を近似することである。画像表示に関して言えば、これは平均的に、特色が◆

$$\partial F = \partial C' + \partial D \times (A \pm \partial A + \epsilon) / (B \pm \partial B + \epsilon) \quad (24)$$

但し、信号は、それらがD項を最大にするように選択されている。全ての実用的な目的から、 $\epsilon$ は多分無視できるであろう。事実、 $\partial A$ 、 $\partial B$ 及び $\epsilon$ 項は、 $A \gg \partial A$ 及び $B \gg \partial B$ である限り無視することができる。従

$$\partial F = \partial C' + \partial D \times A / B$$

\*である。しかし、ユニット上で成分のない領域は試験のために使用できないから、遙かに少ないデータを使用して参照しきい値を確立することができる。しかし、実際の製造環境では殆どの成分は良品であり、良い成分のデータ値は相応してこれを反映するから、上述の統計的方法はそれでも有効である。従って良い成分のデータ値は欠陥成分を検出可能ならしめるための十分な統計的情報を提供する。熱的に捕らえにくい欠陥を検出する能力は、処理のために使用可能な情報量が少ないために、本発明の画像表示バージョン程性格ではないであろう。全ての統計的試験の場合のように、正確さは使用可能なデータの量に正比例する。

【0039】誤差要因TRA画像内に誤差をもたらす要因について説明する。画像を前処理する前に、近似TRA式の形状から量子化誤差の量を推定することができる。

※0.05°C）プラス熱安定の前に画像を撮ることに起因する不確実さと等価である。これは温度安定化誤差Tseと呼ばれ、式で表せば

$$(17)$$

★上限温度Tmaxに到達するものと考えることができる。

時間(t)及び時定数( $\tau$ )の関数として温度安定化関数を表せば、

☆の周囲温度Taの不確実性の関数として表すことができる。

【0041】

40◆保存されているが斑点状の内容が誇張された画像を発生する。

【0042】このことから、計算された画像の不確実性は、近似的に、

【0043】加熱が重大である場合には、誤差項は

17

$$= 2 + (2 \times A/B) \times (T_r + T_{se})$$

に接近する。加熱が最小である場合には、誤差項は

$$\partial F = \partial C' + \partial D \times (\partial A + \varepsilon) / (\partial B + \varepsilon) \quad (26)$$

に接近する。しかし最小加熱  $\varepsilon >> \partial A = \partial B$  を用いれば、良好な近似は

$$\partial F = \partial C' + \partial D = 4 \times (T_r + T_{se}) \quad (27)$$

である。しかし、最小加熱  $T_r >> T_{se}$  とすれば、式 (27) は

$$\partial F = 4 \times T_r \quad (28)$$

まで約すことができる。

【0044】TRA画像内の雑音は、 $T_r$  及び  $T_{se}$  を最小にすることによって減少させ得ることは明白である。 $T_r$  は、TRA画像のピクセルの値を、それらの最隣接値と補間 (平均) することによって大幅に減少させることができる。これは画像の量子化の効果を少なくする。同様に  $T_{se}$  は、タイミング間隔の精度を適切に制御し、タイミング間隔を実行可能な限り長くすることによって最小にすることができる。 $T_{se}$  の式から、 $t > 3\tau$  として安定状態値の95%以上の温度を達成できるようにすれば、 $t$  及び  $\tau$  の効果を最小にできることは明白である。最初に階段関数の熱刺激を印加してから4分後にサーモグラムを記録すれば、十分な結果が得られることが分かった。

【0045】図1乃至図5に示す本発明の方法の流れ図は、MIKRON (登録商標) 6T62サーモトレーサのような市販の熱イメージャを使用するために開発されたものである。これらのイメージャは電気機械式に走査し、熱データのラスト画像を発生する。この画像は、標準ビデオモニタまたはコンピュータインタフェース及びモニタによって見る事ができる。

【0046】基板上に取り付けられた集積回路を試験する場合には、上述の技術は成分 (例えば抵抗、能動デバイス、または“チップ”全体でさえも) の位置だけでデータを入手するためにロボット制御されたセンサを使用するように変更することができる。このような特色は、自動化された装置として使用する場合に欠陥認識データ処理を簡易化するので望ましいと言える。

【0047】図1の流れ図では、段階11において3つの二次元アレイ、またはデータ点の画像状行列、即ち3つの熱画像が、参照サンプルに関して取得される。第1画像は、安定周囲温度における参照サンプルに関するものである。周囲温度に等しいかまたは僅かに低い圧縮空気をサンプル上に吹き付けると、サンプルを比較的急速に周囲温度に安定させ得ることが分かった。第2画像は第1の上昇温度における、または第1の刺激 (例えばサンプルに第1の量の加熱を発生させる第1の電圧) に応答した参照サンプルに関するものである。次いで、典型的にはより強い刺激を参照サンプルに印加して第3画像 (上昇温度における第2の画像) を入手する。サンプルに第1の刺激より5-10%多い加熱を生じさせる刺激が適していることが分かった。2つの異なる階段関数状刺激を同じ印加時間 (例えば4分間) とすると、実質的

18

$$(25)$$

に完全な加熱が得られ、そのようにすることが有利であることも分かった。2つの刺激印加時間が等しいと否とに拘らず、試験サンプルと参照サンプルとに対しては、同じ刺激に関して同じ印加時間としなくてはならない。段階11は、既知の良品質の高度に標準化された試験済サンプルを有していない限り、少なくとも第2の参照サンプルに対して繰り返すことができる。

【0048】段階12において、TRAを特徴付ける初期解析段階が各参照サンプル毎に参照データの集合 (これらのデータの取得に関しては今述べたばかりである) に対して遂行される。段階12は、周囲温度サーモグラフと上昇温度サーモグラフとから第1差記録Bを作成し、上昇温度サーモグラフから第2差記録Dを作成する。段階13においては、参照サンプルを試験サンプルに置換えて段階11及び段階12に示した手順が繰り返される。何等かの比を取る前に、もし望むならば、段階14に示すような予備画像処理段階が遂行される。図2に示すように、段階15において種々の式の何れか1つに従って比解析が遂行される。除算は交換可能であるから、第1の式の“B”と“C”は交換することができる。4つの差記録の各2つ内の全てのデータ点に関する段階15の各比はサンプル内のある点に一致する。TRAがサーモグラフィにおける優れた“正規化”技術であることが証明されているから、段階15において、例えば恐らく極めて類似した“参照サンプル”の比画像を比較することによって、迅速な“健全”検査を遂行できる。比較の結果が著しく異なっていれば、それはさらなる適切な試験技術を要する障害か、または適当な参照試験ユニットを必要とする障害であることを指摘しているのである。

【0049】適切な試験技術に必要とされるのは以下の通りである。

- a. 周囲温度維持のための多分制御された空気流を除き通風がないこと。
- b. 付近に熱源 (サンプル自体の電源を含む) がないこと。
- c. 熱的に安定化させるための空気ジェットによる吹き付けを行うこと。
- d. 触手による加温を回避するために絶縁用手袋を使用すること。

【0050】e. 実際の試験周囲条件への自然な熱的等化を行うために事前試験段階実施位置はTRA装置に近接させるべきであること。これは空気ジェットによる安

定化時間を短縮する。

f. テープ境界反射点（後刻テープ除去の際に静電欠陥が発生しないように要注意）。この技術がサンプルからの赤外放射に依存し、反射は望ましくないことを思い出されたい。成分リードはそうのように取り扱う必要はない。

【0051】g. サンプルの加温を妨げないように、半導体回路に典型的に使用されるエッジコネクタは熱的に周囲温度に維持すべきであること。

h. 空調または日照窓からの大きい熱シフトを経験する領域を避けること。

i. 低熱質量及び高放射率のバッフルを使用して周囲表面及び物体からの反射を防ぐこと。

【0052】j. モジュールからの反射でイメージまたは検出器がそれ自体を見ることがないような視角を探すこと。（このことは長めの視距離とセンサに対するサンプルの小さい傾きとを暗示している。）若干の場合には、正常または無欠陥と考えていた参照（のつもり）サンプルが実際はそうではなく、交換しなければならないことを見出すことがある。

【0053】図2に示すように、最初の（基本）式は差記録から順番に2つの比を誘導することを含み、これらの比記録は更にデータ点毎に比が取られることに注目されたい。各データ点の複合記録は比の比からなる。参照サンプルと試験サンプルとの間の偏差の第1の直接指示は、段階15の複合記録から段階17に従って求められる。多くの場合、さらなる試験は不要であり、段階16の手順は飛ばされて、試験サンプルが参照サンプルに十分に類似しているか否かに関する判定を直ちに行うことができる。実際に、複合記録が背景から標準偏差の倍数のような統計的な限界を超える変動を有していない無特色であることを試験することによって、段階17を自動的に遂行させることができる。この指示が無欠陥を表す。

【0054】もし段階15を遂行した後に望ましくないレベルの曖昧さが存在すれば、即ちもし推測される欠陥が参照サンプルの画像から、第1の所定レベル（“3シグマ”レベル）を超えてはいるが、より低い第2の所定レベル（“シグマ”レベル）よりも上にあれば、特に試験サンプルの熱比画像に対して種々の画像強調技術を使用することができる。これらの技術では、熱比データは元のサーモグラフと同じ二次元で編成され、例えばコンピュータモニタ上で見ることができる。これらが段階16に示す任意選択の事後比解析画像処理段階である。

【0055】例えば、段階16、または図4に示す任意選択の雑音濾波が行われる。もし結果の曖昧さのレベルが、判定を可能ならしめるのに十分な程度まで減少していなければ、段階50は参照サンプル及び試験サンプルの何れかに見出された既知の無欠陥型アーチファクトを、マスキング技術によって除去する。これは、画像強

調技術として天文学及び偵察写真技術においては周知の技術の特定例である。

【0056】考えられる関連強調技術の他の例に関しては、Addison-Wesley(1987)から刊行の R. Gonzalez らの Digital Image Processing、162-163 頁（中間濾波、雑音濾波に関して）、158-160 頁（局所強調、元の画像データからのマスク生成に関して）を参照されたい。適切に強調された熱比画像は段階17において再比較され、試験サンプルに関して例えば何れかの点において第1の所定レベルまたは量（“3シグマ”レベル）を超えているか否かの判定が行われる。段階18に一般的に示してあるように、試験装置及び技術は次の試験サンプル（例えば半導体集積回路の組立ラインを下って来るサンプル）に適用する準備を整える。

【0057】図3は、図1及び図2の手順の一部を電流消費製品に適用して上述の良品試験を実施する場合の若干の点の特定例を示す。図1及び図2の諸段階の部分的な繰り返しである図3の諸段階においては、典型的な電子成分に対して動作性能試験に使用できる正常動作電圧に近い電圧を印加することによって、第1及び第2上昇温度サーモグラフを作成できることに特に注目されたい。例えば、段階34、36、38及び40に示すように、連続熱刺激は正常動作電圧の95%及び正常動作電圧の105%によって与えることができる。本方法のこの柔軟性は、その広いダイナミックレンジによって大いに助長され、そのことはまた、刺激には臨界値が存在しないことを意味している。

【0058】図4は、画像強調の若干の面、特に雑音濾波を扱う図である。段階50～52は各熱比画像の隣接ピクセル間を相対平滑し、結果として斑点雑音が濾波されている画像を得るための手順である。図5は、画像強調の更に別の面を示すものであって、これは段階61～63毎に、1またはそれ以上の元の上昇温度サーモグラフを用いて遂行することができ、空間濾波のための1またはそれ以上のマスク画像を生成するのに有用なものである。

【0059】図6は、TRAに使用される装置の諸成分の相互関係を示す。サーモグラムデータ収集装置91は、赤外データを取得するサンプル96を保持するように構成されている。データは赤外センサ97によって取得される。典型的には赤外センサ97は単一の固定され離散した検知素子であって、サンプル96の露出部分をセンサ97内に含まれるスキャナによって効果的にサンプル即ち走査する。好ましい実施例の赤外センサ97は、例えばMIKRON 6T62サーモトレーサのようなサーモトレーサである。

【0060】代替として、センサ97を半導体電荷結合デバイスカメラとし、それによってMIKRON 6T62サーモトレーサの電気機械式スキャナを省くことができる。このようにすれば画像型データ点のシーケンス

を、例えばこのカメラにおいては典型的であるように、純電子的に入手できる。熱比論理及び記憶装置92は基本的には中央処理装置であり、これは上述の計算を遂行する他に、画像強調装置93及び判定回路94の機能、並びに刺激源95からサンプル96へ印加する熱刺激のタイミング(持続時間制御装置99を介して)と大きさ(ピーク制御装置98を介して)を、センサ97の走査と共に制御する。熱比論理及び記憶装置92は種々の差記録と、参照サンプル比画像と、試験サンプル比画像とを入手する。画像強調装置93は、前述の濾波、平滑及び他の画像強調技術の何れか、並びに従来から周知の技術の何れかを使用することができる。前述のように、実際の画像強調は、図示した位置において遂行する他に、熱比論理及び記憶装置92に印加される前のサーモグラフに、または該装置が入手した差記録に直接操作してもよい。従って、図6の配列は単なる例示に過ぎないのである。

【0061】判定回路94は、複合記録の統計的解析に基づいて(例えば1またはそれ以上の標準偏差によって周囲背景からずれた1またはそれ以上のピクセルの存否を示すことができる)、無欠陥試験サンプルを受け入れたり、または十分な大きさの欠陥を有する試験サンプルを拒絶したりする。TRAは、半導体回路または電子組立体以外の製品に対してより広く適用可能であることを理解すべきである。製造された全ての製品(非生体)に制御された温度変移を経験せしめることができる。組立てライン上で使用することが好ましい用法ではあるが、ある製品の参照サンプルからのデータ(保管されたデー

タでさえも)が使用可能であれば、その製品の耐用期間内のどの時点においても使用することができる。

【0062】当業者ならば付加的な長所及び変更は容易に考えられよう。従って本発明は、その広い面において、図示し説明した特定の細部、代表的なデバイス、及び実施例に限定されるものではない。本発明は特許請求の範囲によって限定される概念から逸脱することなく細部に変更を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の方法の諸段階を示す流れ図。

【図2】本発明の方法の諸段階を示す流れ図。

【図3】本発明の方法の諸段階を示す流れ図。

【図4】本発明の方法の諸段階を示す流れ図。

【図5】本発明の方法の諸段階を示す流れ図。

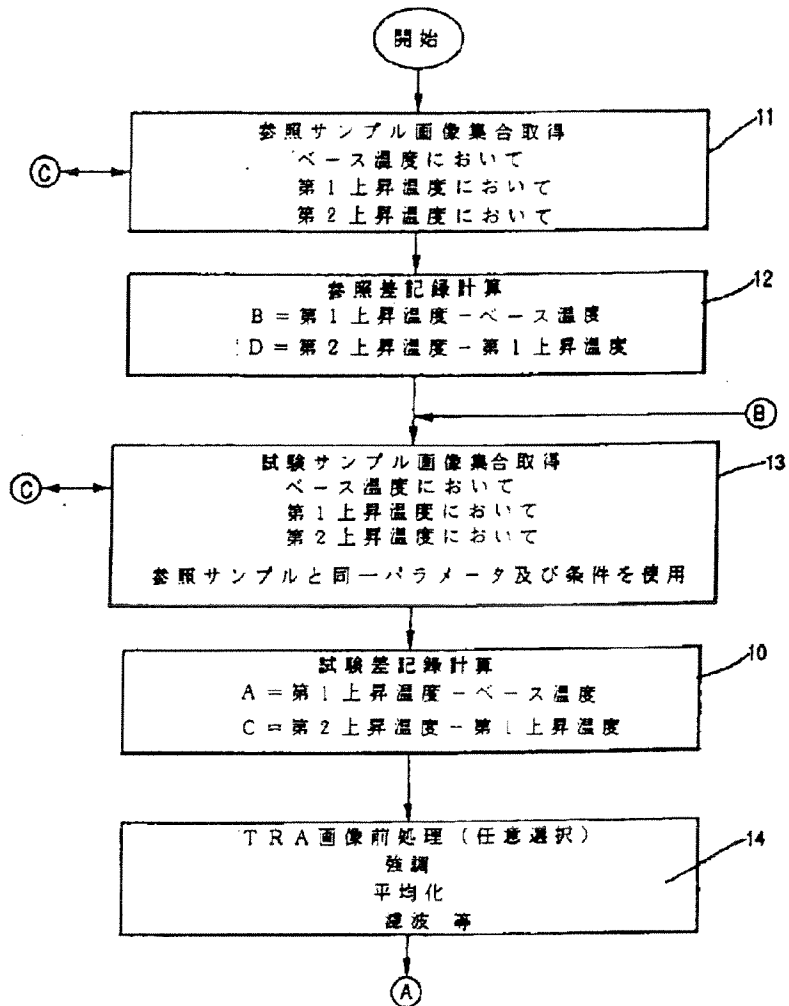
【図6】本発明の方法を実施するための試験装置のプロック線図。

【図7】参照サンプルと試験サンプルの対比点の温度関係を示すバーグラフ。

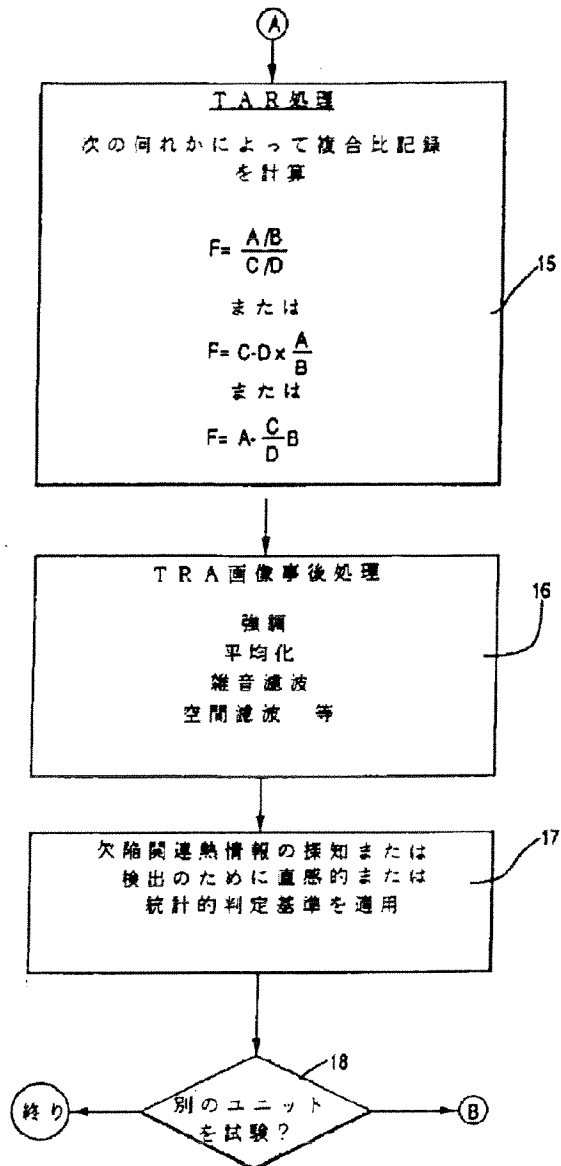
【符号の説明】

- 91 サーモグラムデータ収集装置
- 92 熱比論理及び記憶装置
- 93 画像強調装置
- 94 判定回路
- 95 熱刺激源
- 96 サンプル(モジュール)
- 97 赤外センサ
- 98 ピーク制御装置
- 99 持続時間制御装置

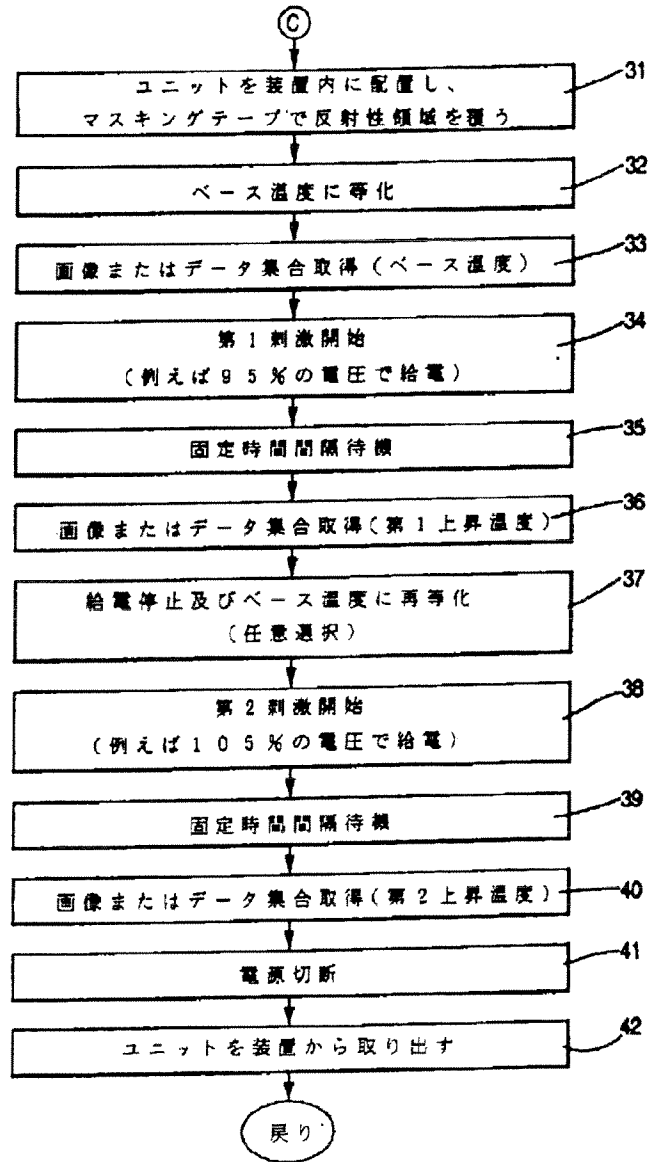
【図1】



【図2】

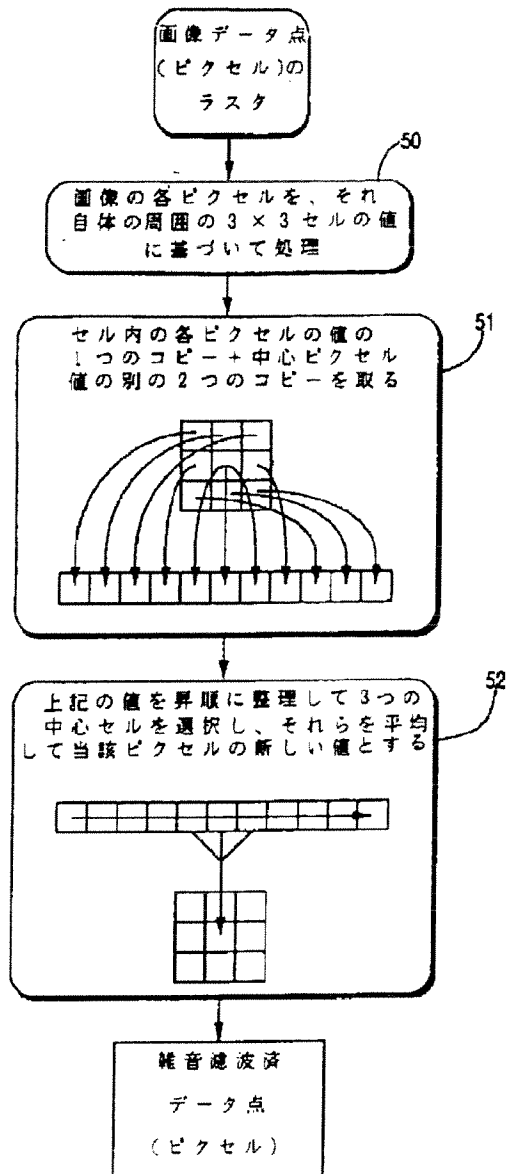


【図3】

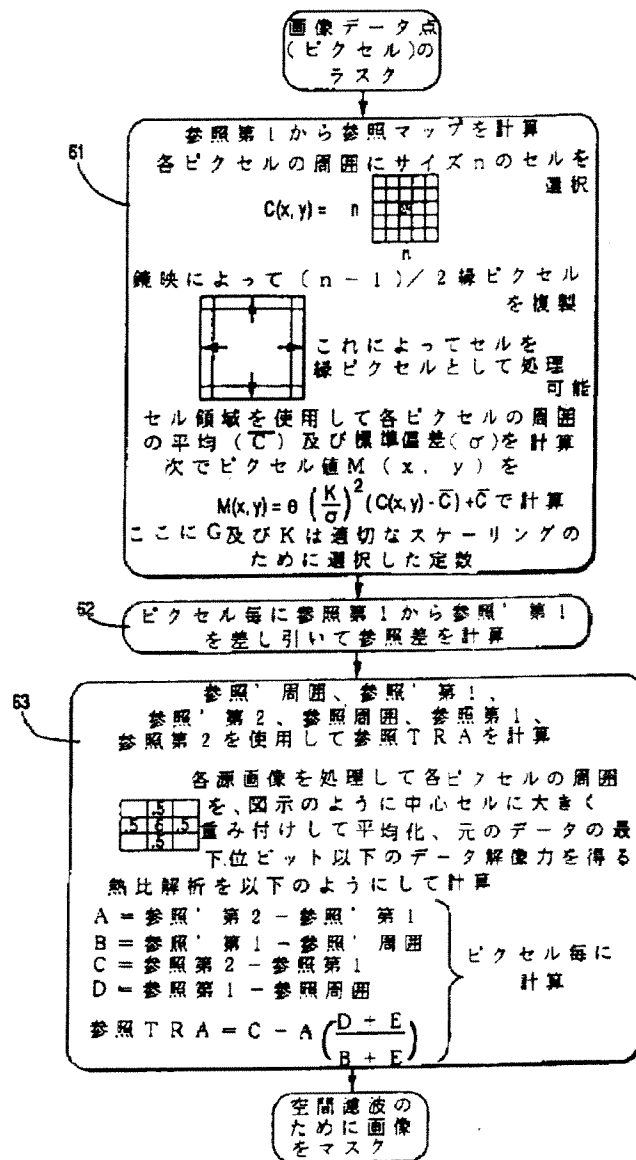




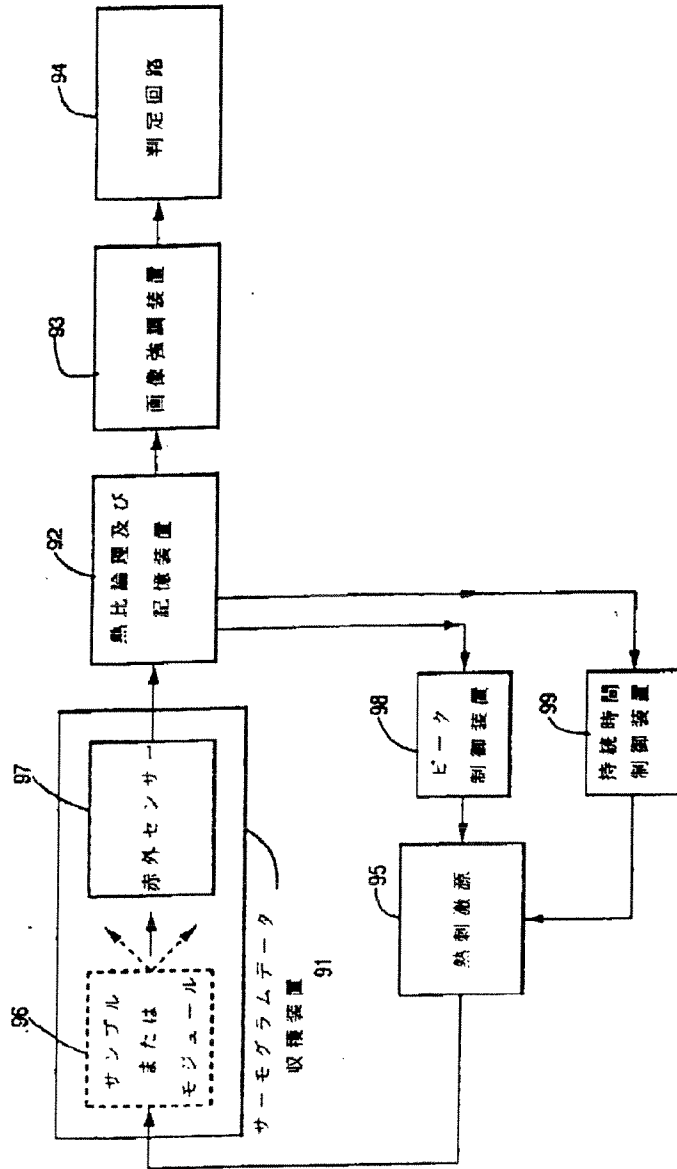
【図4】



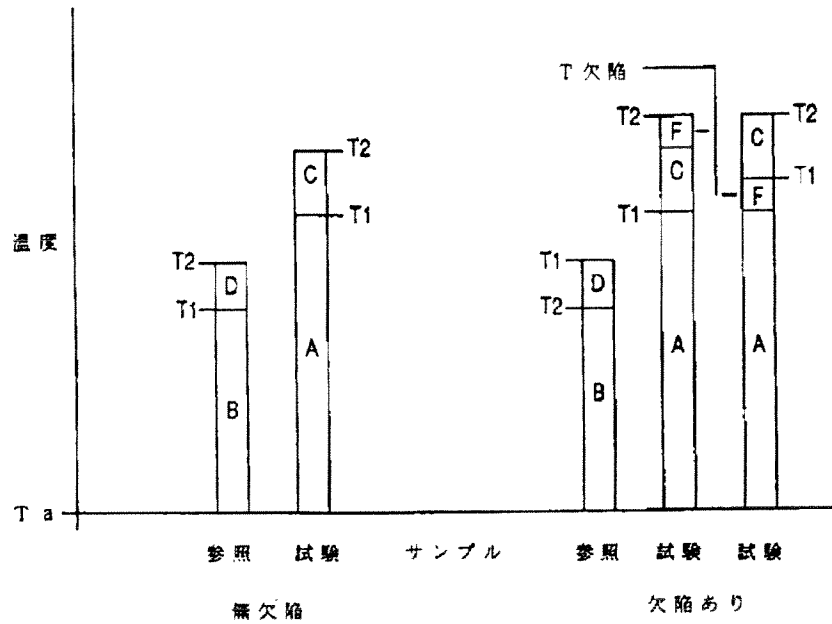
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 マイケル ピーター ローラ  
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州  
 01754メイナード オムーア アベニュー  
 29

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 04-282445

(43)Date of publication of application : 07.10.1992

(51)Int.Cl.

G01N 25/72  
H01L 21/66

(21)Application number : 03-192930

(71)Applicant : DIGITAL EQUIP CORP <DEC>

(22)Date of filing : 01.08.1991

(72)Inventor : COX JR ELDON E  
ROLLA MICHAEL P

(30)Priority

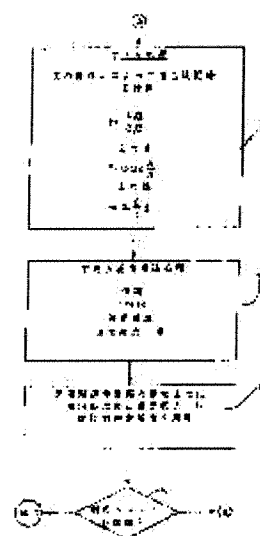
Priority number : 90 582102 Priority date : 14.09.1990 Priority country : US

## (54) METHOD AND DEVICE FOR DETECTING PRODUCT DEFECT USING THERMAL RATIO ANALYSIS

(57)Abstract:

PURPOSE: To detect a defect in a product by using a thermal ratio analysis method.

CONSTITUTION: A thermal record of an ambient temperature of a reference sample at an ambient temperature is formed and a plurality of thermal records of raised temperatures of the sample at a plurality of temperatures which are raised by applying thermal stimulus on the reference sample are formed. A first difference record of the reference sample is formed from the thermal record of the ambient temperature and one of the thermal records of raised temperatures. The reference sample is replaced with a test sample and the above process is repeated, then a difference record of the test sample is formed and at least one ratio record is formed from the reference sample and difference record. A composite record including at least one ratio record is formed. When the composite record statistically generates a great deviation, defect designation is formed. This method is particularly useful for detecting a hidden defect in an electronic circuit, such as an integrated circuit.



## [54] PRODUCT DEFECT DETECTION USING THERMAL RATIO ANALYSIS

[75] Inventors: Eldon E. Cox, Jr., Lowell; Michael P. Rolla, Maynard, both of Mass.

[73] Assignee: Digital Equipment Corporation, Maynard, Mass.

[21] Appl. No.: 582,102

[22] Filed: Sep. 14, 1990

[51] Int. Cl.<sup>3</sup> ..... H01L 31/00

[52] U.S. Cl. .... 250/330; 250/332; 358/106; 374/4; 374/5; 382/1; 382/43

[58] Field of Search ..... 356/237, 389, 391, 394, 356/445; 358/106, 113; 374/4, 5, 10, 45, 57; 250/330, 332, 341, 342; 382/1, 34

## [56] References Cited

### U.S. PATENT DOCUMENTS

4,061,578	12/1977	Kleinerman	250/330
4,154,085	5/1979	Hentze	374/10
4,513,441	4/1985	Henshaw	356/257
4,558,222	12/1985	Neil	250/330
4,755,874	7/1988	Esrig et al.	358/101
4,759,072	7/1988	Yamane et al.	250/330
4,816,681	3/1989	Shimura	250/327.2 G
4,872,052	10/1989	Lindzius	358/106

## OTHER PUBLICATIONS

C. G. Masi, "What Can Thermal Imaging do for You?", Test and Measurement World, May, 1988.

C. G. Masi, "Finding Board Faults with Thermal Imaging", Test and Measurement World, Mar., 1989, pp. 100, 111 and 112.

"Thermal Imager Product Survey", Test and Measurement World, Mar., 1989, pp. 113-115, 120.

Hugh Danaher, "Thermography—Understanding the Expanded Role of Thermal Imagers in Production Testing", Evaluation Engineering, Dec., 1988, pp. 74, 75, 77-79.

Primary Examiner—William A. Cuchlinski, Jr.

Assistant Examiner—G. Bradley Bennett

Attorney, Agent, or Firm—Finnegan, Henderson, Farabow, Garrett and Dunner

## [57] ABSTRACT

A method and apparatus for indicating defects in manufactured products employs, instead of the conventional thermal image subtraction, "thermal ratio analysis", which involves ratios of thermal data and their analysis including statistical analysis. Various techniques for "image" enhancement and for suppression of known artifacts are employed to facilitate the decision as to when a defect is detected. The thermal ratio analysis technique is particularly useful for detecting hidden defects in electronic circuitry, such as integrated circuits.

40 Claims, 7 Drawing Sheets

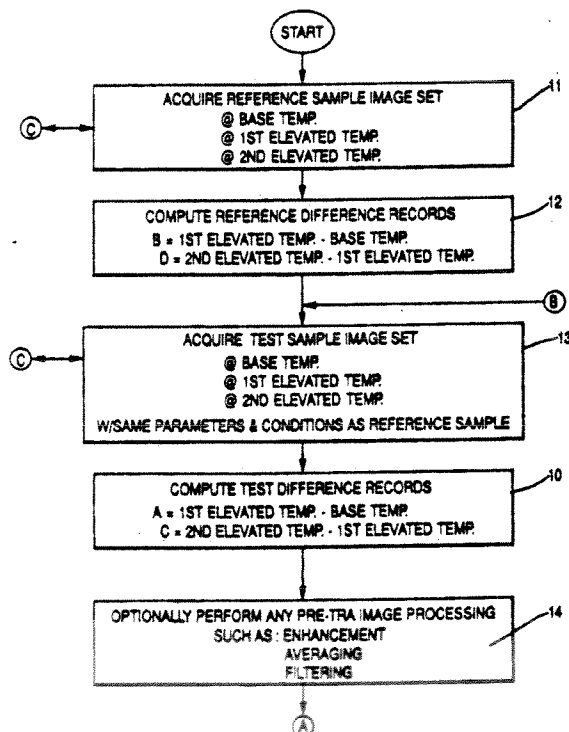


FIG. 1

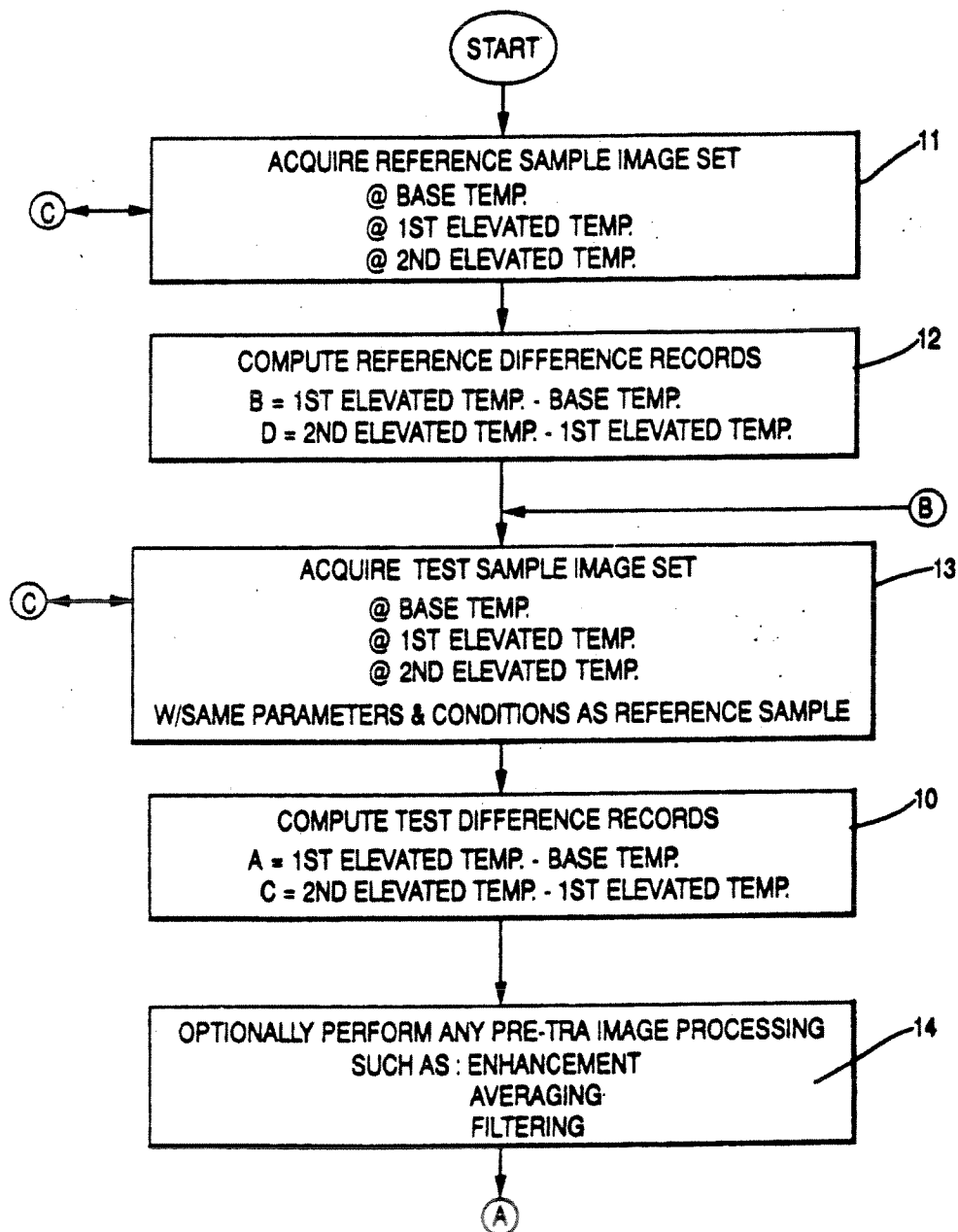


FIG. 2

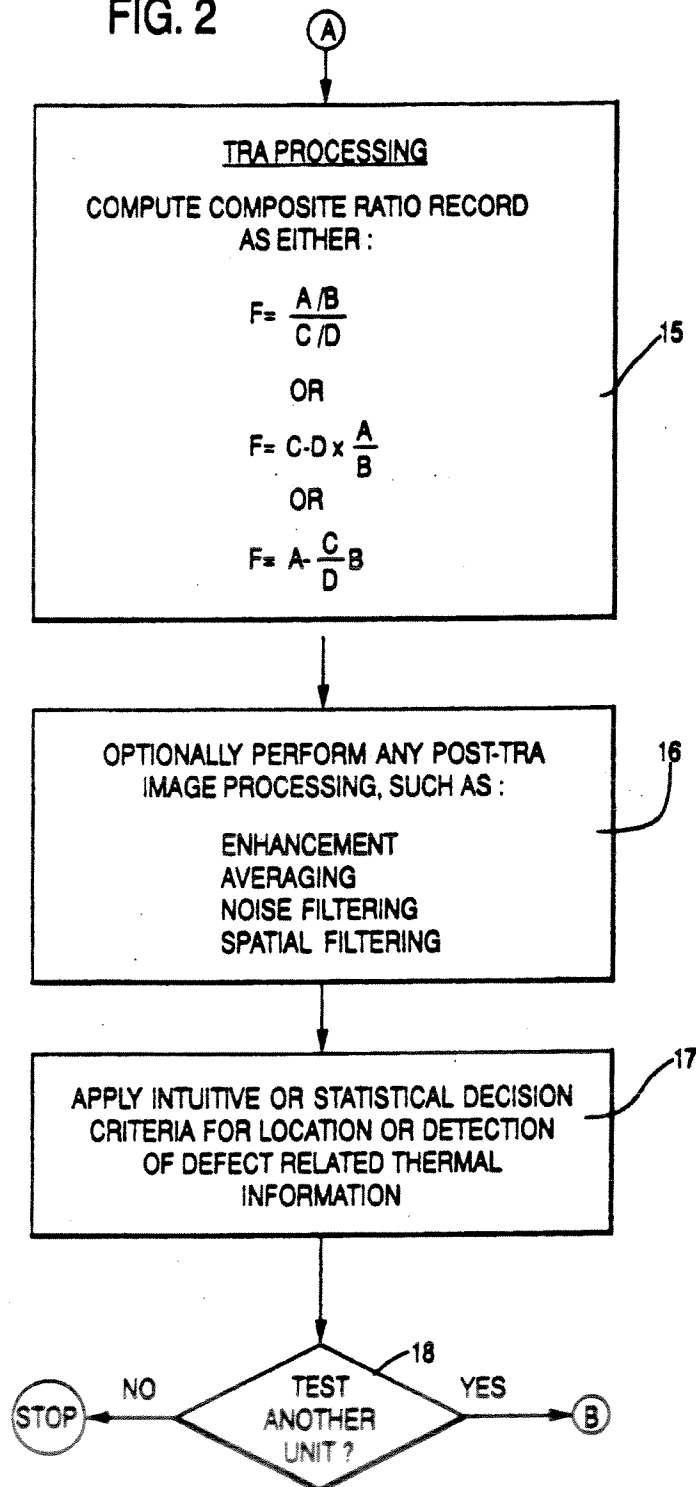




FIG. 3

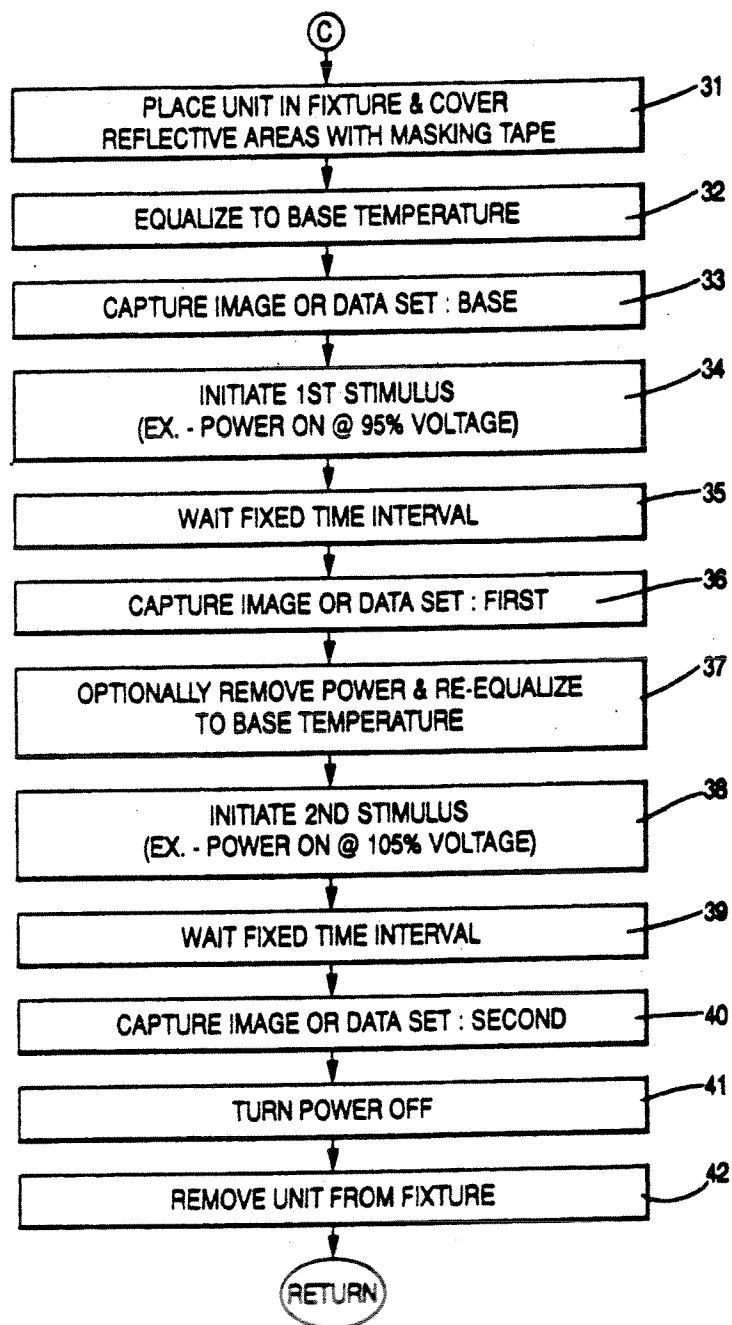


FIG. 4

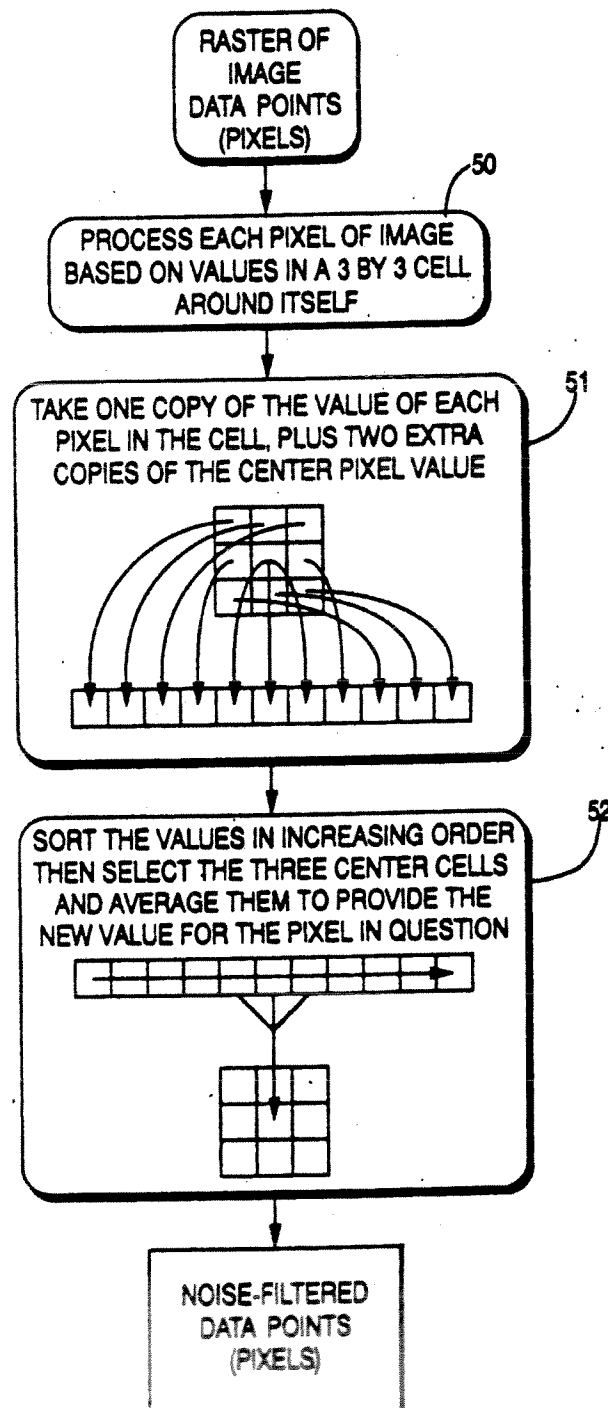


FIG. 5

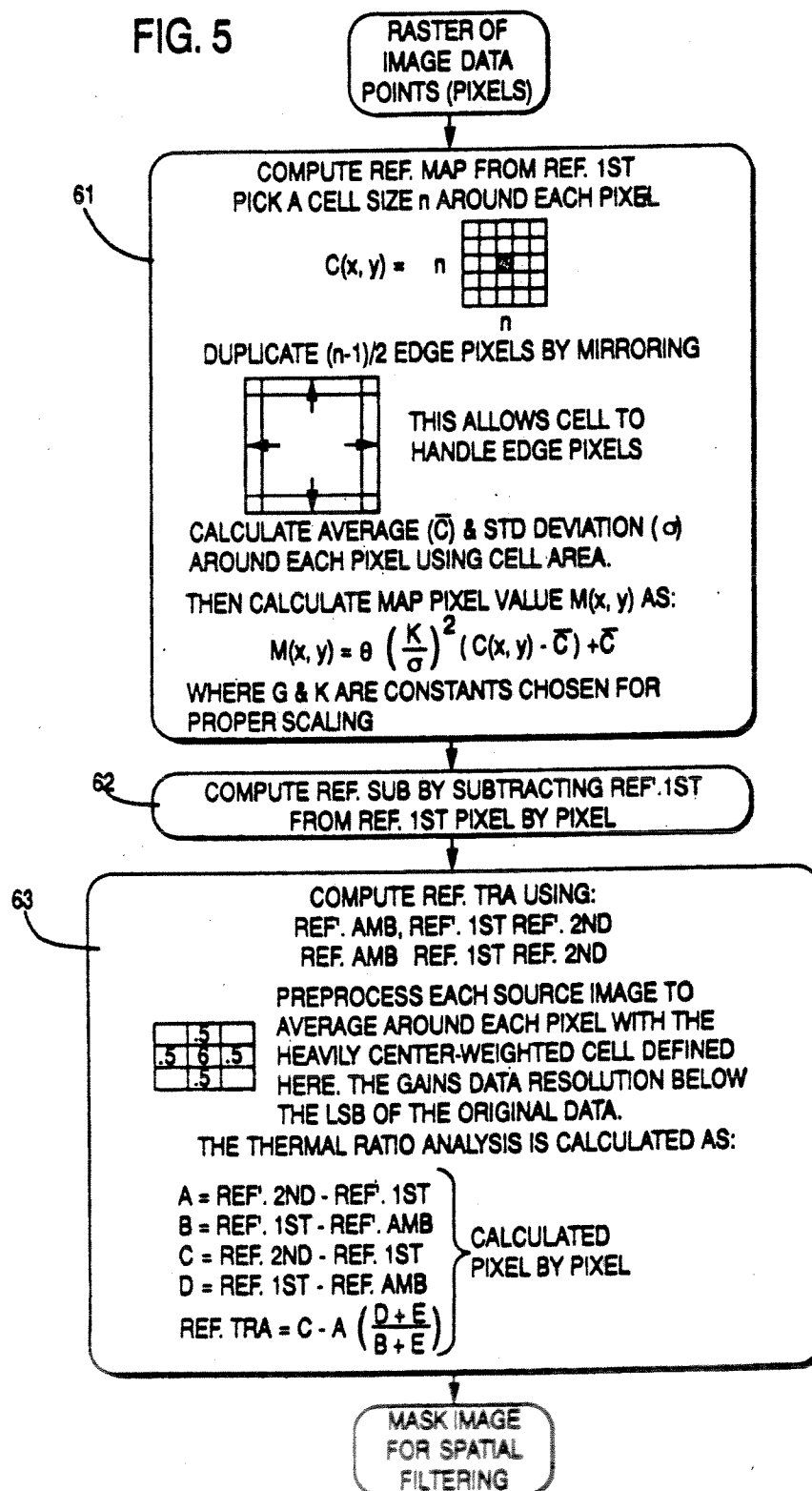


FIG. 6

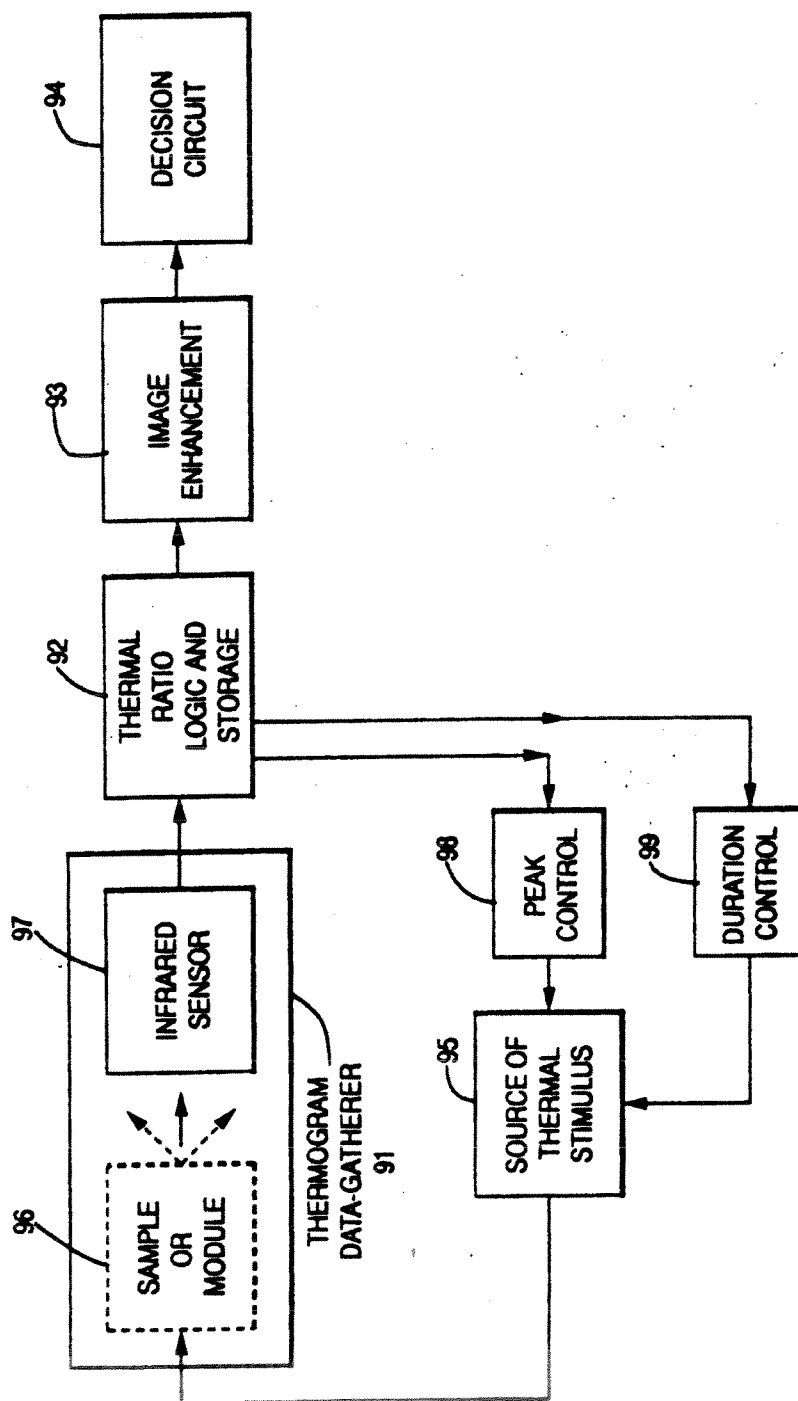
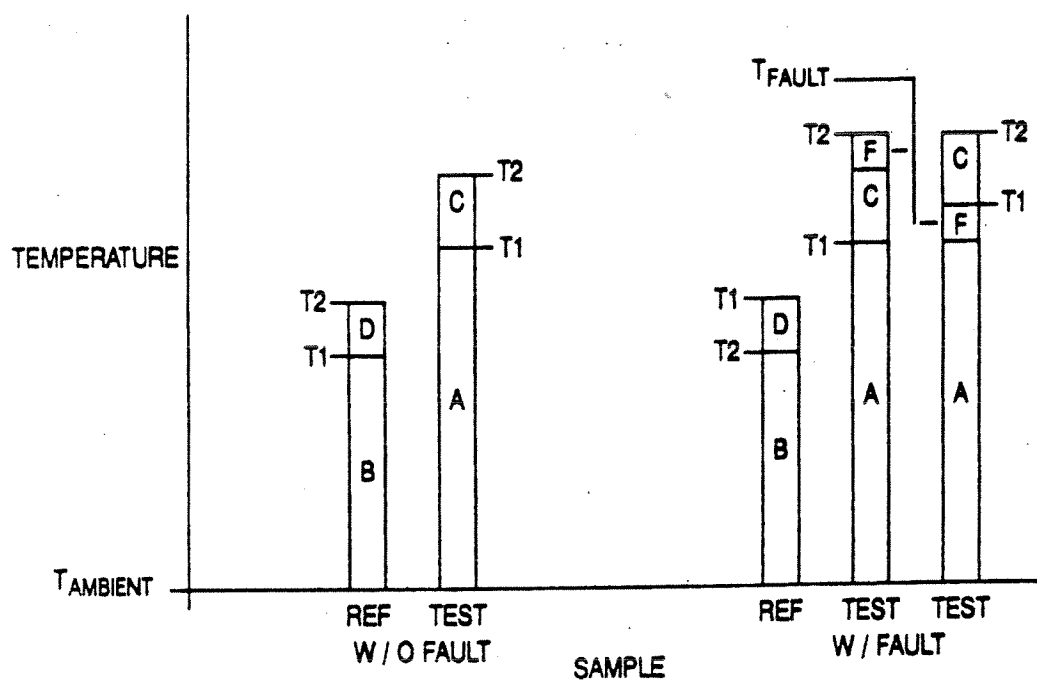


FIG. 7



## PRODUCT DEFECT DETECTION USING THERMAL RATIO ANALYSIS

### FIELD OF THE INVENTION

The present invention relates to product defect detection using thermal analysis.

### BACKGROUND OF THE INVENTION

The early discovery of hidden defects in parts and products is of increasing concern to manufacturers as they strive to obtain superior product quality. Particularly, there is a need for the early discovery of defects which could remain latent, or undiscovered, for an indeterminate time.

Thermography, or thermal analysis, has attracted considerable recent attention as one way of discovering such defects. All objects "glow" from thermal radiation with an intensity and "color" which is dependent upon the temperature. At room temperature this "color" is within a range known as infrared and cannot be seen with the unaided eye. At extreme temperatures an object will glow visibly as in the case of iron heated in a fire. This property can be used to measure the temperature of a surface without need for any kind of contact. Any of several types of equipment can convert this temperature information into a black and white or color image that represents the temperatures within the scene. Such equipment can be called a "thermal imager" and can be used to study non-visible properties of electronic assemblies in the hope of locating defective devices.

It has long been known that patterns of heating effects (e.g., patterns of the infrared glow) in a product may be affected by a latent defect; but the heating effect may not be readily detectable for some types of defects. Particularly in bipolar semiconductor circuits, prior thermal analysis ("thermography") techniques have been only marginally effective in locating defects, except in certain limited situations.

Frequently, the analysis techniques employed with such equipment involve elevating the temperature of the object for at least one of several images. Then images obtained under different conditions are compared in an attempt to remove everything from the image which is normal and leave only the image features that relate to the defect. In the case of semiconductor circuits or components, the different conditions can be the normal powered state and normal non-powered state.

One of these prior analysis techniques is known as image subtraction. Generally, in this technique an image, comprising a regular array of values representing infrared radiation, is obtained from a reference sample, which is a high-quality sample of the product, and is subsequently subtracted from a similar image obtained from a test sample, which is a sample, of unknown quality, of the product. The purpose is to remove features from the difference image which are known to be normal, so as to increase the likelihood that any residue in the difference image is indicative of a defect in the product. Available thermal analysis techniques use image subtraction in one form or another. For example, see the description in the article by C. G. Masi, "Finding Board Faults With Thermal Imaging", *TEST AND MEASUREMENT WORLD*, March, 1989 pp. 100, 111, 112. The image subtraction technique in this article, as described in connection with a circuit board, starts with the board in a known thermal state (e.g., the entire board at 22° C.). The test operators then apply a given

power source to the board and monitor changes in the thermogram as the board heats up to operating temperature.

The basic phenomenon employed in image subtraction thermography for such products is black-body radiation from ohmic heating of current-carrying traces and components, as explained in the article by C. G. Masi, "What Can Thermal Imaging Do For You?" *TEST AND MEASUREMENT WORLD*, May, 1988. It is also known, however, that image subtraction thermography can be applied to non-current-carrying products, to the extent such products can be subjected to controlled thermal changes.

The monitoring of thermal changes by image subtraction is based on the premise that the thermal changes for a non-defective product should be different from the thermal changes for a defective product. Thus, if the thermogram for a known non-defective product (sample) is subtracted from the thermogram for a product (or sample) being tested, the differences, if any, are hoped to be indicative of a defect. Conversely, if a hidden defect does exist in a sample, it is hoped that it will produce a thermogram which is different from the thermogram of the non-defective sample. The greatest successes in the prior art techniques have been for products which produce relatively little heat. However, products such as transistor-transistor-logic circuits which produce much heat have yielded marginal success in diagnostic testing using prior art techniques. The problem appears to be that the variability of heating among non-defective (normal) samples can be much larger than the effect upon heating produced by a sample having a subtle defect. This tendency makes such defect difficult, if not impossible, to detect by previously known image subtraction techniques.

### SUMMARY OF THE INVENTION

It is an object of the present invention to overcome the limitations of image subtraction thermography. It is desirable to provide a method and apparatus to emphasize those thermographic differences between a reference sample and a test sample which are likely to be indicative of a defect, relative to differences which are not likely to be related to a defect.

Additional objects and advantages of the invention will be set forth in part in the description which follows and in part will be obvious from the description, or may be learned by practice of the invention. The objects and advantages of the invention may be realized and obtained by means of the instrumentalities and combinations particularly pointed out in the appended claims.

The invention is based upon the recognition that more defect-sensitive analysis can be achieved by obtaining a ratio of variables related to thermographic responses to two differing non-equilibrium thermal stimuli, applied first to a previously tested product ("reference sample"), known to be good, and then applied subsequently to a test sample of the same product. The term "thermal stimulus" or "thermal stimuli" as used herein refers to any stimulus, not necessarily thermal in origin, which when applied to a sample of a product, ultimately has an effect of changing the temperature thereof. A stable base level, or equilibrium, thermogram for each sample also is involved in determining the variables.

Four difference records relating to the reference sample and the test sample are generated, and therefrom

at least one ratio record is derived. A composite record is formed from the ratio record and the unused difference records; and a defect indication is generated when the composite record yields a statistically significant deviation from an expected value.

The statistical basis for such defect detection will be discussed in detail later.

The technique of this invention has been termed Thermal Ratio Analysis (TRA). The invention resides both in a method and in test equipment for obtaining at least one pattern of thermal ratios from a plurality of thermal difference records obtained from a reference sample and from a test sample, and for forming a composite record including at least one pattern of thermal ratios. Since these samples are like samples of the same part or product, they will be termed a "reference sample" and a "test sample".

According to a principal feature of the invention, a method of detecting a defect in a test sample of a manufactured device is provided which comprises the steps of: establishing a reference record for at least one reference sample of the device, comprising the sub-steps of:

(1) making a base thermal record of the reference sample at a base value of a thermal stimulus;

(2) making a plurality of changed value thermal records of the reference sample at a plurality of respective changed values, compared to the base value, of the thermal stimulus, including applying a respective changed-value thermal stimulus to the sample; and

(3) making a first-difference record from the base-value thermal records and one of the plurality of changed value thermal records and a second difference record involving at least another of the plurality of changed-value thermal records, the first and second difference records each comprising a plurality of data points in an image-related array;

generating a test record for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample;

deriving at least one ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the test sample and the first and second difference records for the reference sample;

forming a composite record including at least the derived one ratio record; and

generating a defect indication when the composite record yields a statistically significant deviation from an expected value.

In the preferred embodiment, the thermal stimuli which are changed in the steps of producing first and second thermographs are voltages of first and second magnitudes that are applied to the samples in such a way as to produce heating therein; and the base-level thermograph is an ambient-temperature thermograph.

One embodiment is immediately applicable to electronic components on a populated circuit board and can be extended by use of masking and filtering techniques, sometimes called image enhancement techniques, and by use of robotic scanning control, to integrated semiconductor circuits, in particular, packaged ones, mounted on ceramic substrates or printed circuit boards.

In another embodiment of the invention, the thermal stimuli are voltages which are changed in duration rather than magnitude. This embodiment is advantageous, among other reasons, if electronic components or circuitry such as semiconductor components or circuitry are to be tested under conditions more realistic as

related to an intended mode of operation in a computer or a timing program control. In fact, it is certainly reasonable to consider doing some carefully-timed operational testing simultaneously with the thermal ratio analysis.

The principles of the invention extend to all products that can be thermographically tested. For non-current-carrying products, microwave radiation can be considered as one likely stimulus to be employed. In such manner, these products or, more specifically, test samples of these products, can be tested by methods and equipment within the scope of the appended claims.

The accompanying drawings, which are incorporated in and constitute a part of this specification, illustrate one preferred embodiment of the invention and, together with the description, serve to explain the principles of the invention.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

FIGS. 1-5 are flow diagrams illustrating steps of the method of the invention;

FIG. 6 is a diagram of a test set-up for practicing the method of the invention; and

FIG. 7 is a bar graph showing temperature relationships for comparable points for a reference sample and a test sample.

#### DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

An example of the preferred method is shown in the flow diagrams of FIGS. 1-5.

The method of the invention overcomes the limitations of image subtraction techniques by compensating for the expected thermal variations among like samples of a given product. The invention works on the premise that the ratio of heating of like samples under different thermal stimuli should be a constant. If a functional defect or other abnormality is present in a sample, it is expected to cause the thermal response for at least one of the thermal stimuli to deviate from the expected value; and this expectation has been borne out in practice. This alters the ratio of heating observed for that sample at a particular data point in an image-related array of data points and thus indicates that data point as the locus of either an actual defect, a defect-related symptom, or a latent defect. For purposes of this application, a defect is any deviation from acceptable quality or properties of a product.

Normal thermal variations cancel when ratios of two arrays of image differences are derived for measurements from the same sample or from the reference sample and the test sample. To complete the technique, the measurements are formed into a composite record including two other arrays of image differences, for corresponding data points in each array, for the reference sample and the test sample. Illustratively, to form a composite set of measurements, a different ratio record can be derived, and then the ratio of the ratio records can be taken as a means of discerning correct from incorrect temperature profiles. In general, a defect is indicated when an anomalous region or datum appears in the composite record.

At present two types of stimuli have been identified as being useful with TRA in accordance with the present invention. The first and simplest is to vary the voltage applied to power the sample - typically using the maximum and minimum voltages specified for the sample. The sample can be a stand-alone sample or part of

a larger functional group. It can be tested in a totally static test, or in a full simulation of its expected operation, if timing constraints of the thermal ratio analysis are compatible therewith. Static testing does, however, eliminate the possible interaction of a simulation and heating effects, that is, operation altered by software taking non-normal decision-loop branches during the simulation due to the defect. The simulation type of test purposely depends upon the heating effects introduced by two software routines or clocked verses non-clocked operation -- in fact, this type of test simply can be designed to simulate operation of the sample and even to simulate the effect of the more unusual durational stresses of signals upon the sample, by primarily affecting the duration of each stimulus instead of its magnitude.

The thermal variation observed between different non-defective samples of a product is largely due to manufacturing and design tolerance within the samples themselves. For electronic circuitry, this variation has both a linear and non-linear ohmic component with respect to the applied voltage and is also subject to any dynamic stimulation applied. The amount of temperature rise above ambient is related linearly to the power dissipated multiplied by some constant, in the case of an integrated circuit, due to the packaging thereof. This packaging can vary from circuit to circuit but is not a function of any external stimuli. Thus, the temperature rise expected to be observed is, internally, a function of the packaging and the linear and non-linear resistances and, externally, a function of the applied voltage and dynamic stimulation (i.e., software).

Defects can manifest themselves as modifications of the internal resistive structures of an electronic sample and are difficult to discern from normal variations using standard image subtraction. It is not understood from prior art thermography techniques that taking the ratio between two temperature rises will produce a characteristic thermal signature of a product, or a point in a product. Defects also have a strong tendency to be functions of the external variables which differ from those functions exhibited by their normal counterparts. For example, the non-linear resistances of normal samples of a product usually have the same non-linear relationship and differ only by a linear constant. If a sample is stimulated by applying power at two different voltages, and the subsequent steps of our invention are employed, the two measured temperatures at any corresponding data points will be related by two terms: (1) the non-linear resistance expressed as a function of the ratio of the applied voltages (the ratio raised to the power  $\alpha$ , where  $\alpha$  does not equal 0), and (2) the square of the ratios of the two voltages. All the linear relationships which are equally shared will drop out.

Thus the ratio of temperature rise above ambient for two different voltage levels should be a constant from sample to sample of the same product. Even the thermal constant of the package drops out of the calculation except in cases of extreme changes in packaging. It is therefore possible to measure a reference sample and a test sample of the same product and substantially to cancel or eliminate the expected variation, by following analysis steps appropriately including at least one ratio, and, illustratively, steps including taking a ratio of ratios. When this is done, as it will be mathematically shown below, then all of certain terms in the expression for the values of the image-related data points, even the term related to the square of the voltages, drop out.

What is left is an image highlighting only those pixels (data points in the resulting array) for which the reference sample and the test sample exhibit substantial differences in their "non-linear" characteristics.

A mathematical derivation of the principles just described concerning the use of a dual-level voltage stimulus for thermal ratio analysis, in accordance with the invention, follows:

The temperature rise  $\Delta T$  above the ambient of a sample is equivalent to the power dissipation (Pd) multiplied by a constant (Cp) related to the packaging and heat-sinking of the sample.

$$\Delta T = T(E) - T_{\text{ambient}} = C_p \times P_d(E),$$

where  $T(E)$  is the elevated temperature produced by applied voltage E.

$$\text{Since: } P = E \times I(E) \quad (1)$$

$$\Delta T = C_p \times E \times I(E) \quad (2)$$

Since:

$$I(E) = E/R(E) \quad (3)$$

$$\Delta T = C_p \times E^2/R(E) \quad (4)$$

But resistance can be replaced by its reciprocal G, conductance:

$$\Delta T = C_p \times E^2 \times G(E) \quad (5)$$

Conductance can be modeled as a function of E with linear and non-linear terms . . .

$$G(E) = \beta \times E^\alpha \quad (6)$$

$$\Delta T = C_p \times E^2 \times \beta \times E^\alpha \quad (7)$$

the relationship being non-linear to a degree dependent upon the degree to which  $\alpha$  deviates from zero. If images are taken at two voltage levels and the temperature difference ratio,  $T_{2:1}$  taken between them, then . . .

$$T_{2:1} = (\Delta T_2 / \Delta T_1) = (C_p \times E_2^2 \times \beta \times E_2^\alpha) / (C_p \times E_1^2 \times \beta \times E_1^\alpha) \quad (8)$$

$$T_{2:1} = \frac{E_2^2}{E_1^2} \times \frac{E_2^\alpha}{E_1^\alpha} \quad (9)$$

At this point, many of the unwanted terms have already cancelled out.

Assume a reference sample is imaged and has a temperature ratio of  $T_{rs}$  and a test sample has a ratio of  $T_{ts}$ . Taking the ratio of the ratios yields. . .

$$\frac{T_{ts 2:1}}{T_{rs 2:1}} = \frac{E_2}{E_1} (\alpha_{ts} - \alpha_{rs}) \quad (10)$$

Thus the resultant image is a function only of the applied voltages and the difference in the non-linear component of the internal resistances. That is, detectable differences exist at the array of data points when  $\alpha_{ts}$  does not equal  $\alpha_{rs}$ , which in general will be true when the  $\alpha$ 's do not equal 0. If the non-linear resistances are equal, then the result goes to unity. Thus, this can become a sensitive measure of non-linear defects, be-



cause the small, but readily variable, non-linear term is not swamped by larger linear variations, which have cancelled out.

It is also possible to hold the voltage constant and to vary the dynamic stimuli, usually by changing the software or by turning a clock on or off. The mechanism used here is that the heat generated by a defect will depend upon how the duration of a thermal stimulus is changed as well as upon its magnitude.

The general temperature relationships for any TRA, regardless of stimulus, can be seen in the diagram in FIG. 7.

The temperatures measured in response to the two stimuli are T1 and T2. The original ambient temperature is Ta.

In the case of two non-defective samples of the same product, the ratio of temperatures due to the two stimuli should be equal between the reference sample and the test sample, within the limits of noise and measurement error. From the mathematical development above and by reference to FIG. 7, we have:

$$\frac{A/B}{C/D} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{A}{B} = \frac{C}{D} \text{ or } \frac{A}{C} = \frac{B}{D} \quad (12)$$

These are obtained directly by measuring Ta, T1, and T2 for both samples and performing the appropriate subtractions. (For example, D=T2-T1 for the reference sample).

In the case of a defective sample, the original temperature components (A, B, C and D) can be considered to be identical to the scenario relating to non-defective samples. However, they are not directly measurable due to the temperature component added by the defect (F) - see FIG. 7. As shown, the defect temperature component F could show up as a function of either or both thermal stimuli.

Without carrying the analysis further, one can then arrange thermal ratio analysis to involve the use of three ratios, first, following either of the alternative forms of equation (12) to obtain two of the ratios, and then taking a ratio of ratios for each data point as suggested by equation (11).

In practical terms, once one has the four difference records generated as described above, TRA can be carried out fundamentally by the following: deriving first and second ratio records from the first and second difference records for the reference sample and the first and second difference records for the test sample, either by taking the ratio of the first difference records and the ratio for the second difference records in the same order, after which one takes the ratio of the ratios, or by taking the ratio for the difference records for the reference sample and the ratio for the difference records for the test sample in the same order, after which one takes the ratio of the ratios.

An estimate of F can be made by assuming that F only modifies the value of C. (Other approximating assumptions can also be made to like effect). By rearranging the equation above, an estimate of what C should be, based on the measured values of A, B and D, can be made. This is then subtracted from the value (C') measured for T2-T1 for the test sample.

$$C = D \times \frac{A}{B} \quad (13)$$

$$C = C + F \quad (14)$$

$$F = C - C = C - D \times \frac{A}{B} \quad (15)$$

Equation (15) is just one of many approximate algebraic transformations of equation (11).

In fact, as equation (15) suggests, in this algebraic transformation of equation (11), TRA can be considered to be a particular type of image subtraction which has been normalized to compensate for predictable variations between like components. This is a particularly useful embodiment of the invention.

Looked at another way, this approximate form of TRA requires, in its simplest form, that only one ratio be taken, the ratio being taken for comparable difference records from the reference sample on the one hand, and the test sample on the other hand, providing one is willing to accomplish the multiplication and ultimate or "normalized" difference taking, involving the other difference records.

The preceding analysis demonstrates the simplicity of TRA, showing why it provides an image in which many otherwise expectable artifacts are removed because of the use of ratios.

From equations (10) and (11) it is established that a ratio of ratios calculated from the measured thermal values should equal one (1) in cases where no defect exists. If desired, it is also possible to present the thermal ratio relationship in an alternate form by means of any applicable algebraic transformation. Equation (15) is an example of a transformation that affects the thermal information such that values corresponding to no defect tend toward zero (0) instead of one. This form also has the advantage that calculated values will be symmetrical on either side of the no defect level.

In either case, there is some natural variation, or scatter, in all measurements that will follow statistical laws. For this reason the results of a TRA calculation will never exactly go to one for equation (11) [or zero for equation (15)]. Instead there will be random distribution of data values, or scatter, which will be centered around the central value. This distribution will be strongly center weighted and will have some characteristic spread (i.e., standard deviation) that is dependent on environmental factors and the quality of the components in the TRA system. Presented as an image, this would appear as some degree of noise or non-uniformity in an otherwise uniform background.

The TRA values associated with defects will tend to not approach the central value (one or zero, depending on the equation used). The method for the detection of defect-related thermal information is a simple statistical test. A value for the spread, or scatter, of the measurement data is calculated (standard deviation is a good measure). This spread may encompass the entire test field, or only a local area of it. A threshold is set based upon a multiple of this spread value. Common statistical practice usually picks a multiple between two and three times the standard deviation ("sigma"). This threshold is then set above and below the central value. If a multiple of two is used, then 95% of the normal noise should fall between the two thresholds. If the multiple is three, then 99% of the normal noise should fall between the

limits. Any TRA value that falls beyond one of these ranges represents a possible indication of a fault.

The certainty of the defect indication can be biased by two considerations. First, values that far exceed the thresholds usually can be considered to be stronger defect indications than form an image, most real components are large enough that at least several distinctive adjacent thermal ratio analysis values will correspond to a given component. The uncertainty of the defect indication is inversely proportional to the number of related TRA image values that exceed the thresholds. Thus, a general principle is that the more image points that correspond to a component, where these image points have substantial contrast with respect to the general background, the lower the threshold can be to maintain a given certainty for the defect. For any given size of component (in terms of number of image values) it is possible to set a dynamic test threshold that maintains a fixed probability of falsely indicating a good device or not detecting a defective device. These are standard statistical methods for detecting desired features in the presence of noise.

The emphasis on defect detection up to this point has been in regard to the preferred embodiment of the invention in which the TRA data values comprise an image. In that case, the formal statistical approach to defect detection presented above can often be abandoned in favor of a more intuitive approach based on visual inspection of the image. Simply stated, defects will appear as points or regions which stand out by virtue of a significant (or greater than average) contrast in displayed intensity (or color) from the rest of the image.

The invention however is not restricted to imaging applications alone. An embodiment of the invention is possible in which discrete temperature measurements are made only at single points, usually corresponding to individual components on a unit. Obviously such measurements are not spatially related to each other and do not form an image array of data values. In this case the formal statistical analysis is required to discern defect-related thermal values from normal ones. However, much less data is available to establish a reference threshold because the non-component areas of the unit are not available for examination. The statistical method described above is still valid, however, due to the fact that in a real manufacturing environment most components will indeed be good (non-defective) and the data values of the good components correspondingly will reflect this. Thus the data values of the good components will provide sufficient statistical information to enable the detection of defective component(s). The ability to detect thermally subtle defects will not be as accurate as the imaging version of this invention due to the smaller amount of information available for processing. As in all cases of statistical testing, accuracy is directly related to the amount of data available.

### ERROR FACTORS

Some explanation needs to be given to the factors that contribute to the introduction of error into the TRA image. The amount of quantization error prior to any image pre-processing can be estimated from the form of the approximate TRA formula:

$$F = C - D \times \frac{A + \epsilon}{B + \epsilon} \quad (16)$$

Before this can be used however, the variables that introduce error should first be considered. The uncer-

tainty ( $\partial T$ ) in any temperature measurement  $T$  is equivalent to the minimum temperature resolution of the imager  $Tr$  (usually  $\pm 0.05$  degree C.), plus any uncertainty due to taking the image prior to thermal stabilization. This will be called the temperature stabilization error,  $Tse$ , so that:

$$\partial T = Tr + Tse \quad (17)$$

To estimate  $Tse$ , the temperature stabilization function must be modeled. This can be considered to roughly approximate an exponential which has an associated time-constant, and that ultimately reaches some upper temperature limit,  $Tmax$ . Expressed as a function of the time ( $t$ ) and the time-constant ( $\tau$ ), the temperature stabilization function is:

$$Ts(\tau, t) = Tmax \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (18)$$

To express the uncertainty of  $Ts$  in terms of the values and uncertainty of  $\tau$ , and  $t$ , we can use:

$$Tse = Ts(\tau + \partial\tau, t + \partial t) - Ts(\tau, t) \quad (19)$$

$$Tse = Tmax \times (e^{(t+\partial t)/(\tau+\partial\tau)} - e^{t/\tau}) \quad (20)$$

In connection with the TRA formula, each of the terms  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , and  $D$  is actually the difference between either  $T1$  or  $T2$  and the original ambient temperature  $Ta$ . Therefore, the net cumulative uncertainty for each of these terms can be expressed as a function of the uncertainties of the second measured temperature  $Tm$  (Either  $T1$  or  $T2$ ) and the original ambient temperature  $Ta$ :

$$\partial A = \partial B = \partial C = \partial D = \partial Tm + \partial Ta \quad (21)$$

However,

$$\partial Tm = \partial Ta = Tr + Tse \quad (22)$$

Therefore,

$$\partial A = \partial B = \partial C = \partial D = 2 \times Tr + 2 \times Tse \quad (23)$$

This is due to the fact that error terms always add, even when the normal (non-error) terms are subtracted. The net effect of adding error terms is to approximate a normal distribution function, with an average of zero and  $\pm 3\sigma$  points equal to  $\pm$  the sum of all the error terms. In terms of imaging, this produces an image where, on average, the features are preserved but the speckle content is exaggerated.

From this, the uncertainty of the calculated image approximately can be expressed as:

$$\partial F = \partial C + \partial D \times \frac{A + \epsilon}{B + \epsilon} \quad (24)$$

wherein the signs are chosen such that they maximize the  $\partial D$  term. For all practical purposes, the uncertainty of  $\epsilon$ , can probably be ignored. In fact, the  $\partial A$ ,  $\partial B$  and  $\epsilon$ , terms can be ignored as long as  $A \gg \partial A$  and  $B \gg \partial B$ . Two generalizations on the error in the derived defect-related image that describes those areas of the image where significant heating occurs versus those areas where little heating occurs can therefore be made.

Where the heating is significant, the error term approaches:

$$\begin{aligned}\partial F &= \partial C + \partial D + \frac{A}{B} \\ &= 2 + \frac{2 \times A}{B} \times (Tr + Tse)\end{aligned}\quad (25)$$

Where the heating is minimal, the error term approaches:

$$\partial F = \partial C + \partial D \times \frac{\partial A + \epsilon}{\partial B + \epsilon} \quad (26)$$

But with minimal heating  $\epsilon > \partial A = \partial B$ , so a good approximation is

$$\partial F = \partial C + \partial D = 4 \times (Tr + Tse) \quad (27)$$

But, then again, with minimal heating  $Tr \gg Tse$ , so this reduces to:

$$\partial F = 4 \times Tr \quad (28)$$

It should be obvious that noise in the TRA image can be reduced by minimizing  $Tr$  and  $Tse$ .  $Tr$  can be reduced significantly by interpolating (averaging) the values of the pixels of the TRA image with their nearest neighbors. This lessens the effect of quantizing the image. Likewise,  $Tse$  can be minimized by properly controlling the accuracy of the timing interval and making the timing interval as long as feasibly possible. From the formula for  $Tse$ , it can be seen that the effect of  $\partial t$  and  $\partial \tau$ , can be minimized by making  $t > 3\tau$  which allows the temperature to achieve greater than 95% of its steady state value. It was found that recording a thermogram four minutes after a step function thermal stimulus was first applied produced adequate results.

The flow diagram of the method of the invention shown in FIGS. 1-5 has been developed using commercially available thermal imagers such as the MIKRON® 6T62 Thermo Tracer. Such imagers rely upon an electro-mechanical scanning system to route received infrared radiation to a fixed discrete infrared sensor and it produces a raster image of thermal data which can be viewed by a standard video monitor or by means of a computer interface and monitor.

For testing integrated circuits mounted on boards, the technique could be modified to use a robotically controlled sensor to obtain data only at component (e.g., resistor, active device, or even an entire "chip") locations. This latter feature is desirable because it simplifies defect recognition data processing when used as an automated system.

In the flow diagram of FIG. 1, three two-dimensional arrays or image-like matrices of data points, that is, three thermal images, are acquired for a reference sample, in step 11. The first image is for the reference sample at stable ambient temperature.

It has been found that blowing compressed air at or just below ambient temperature over the sample will allow it to stabilize at ambient temperature relatively quickly. The second image is for the reference sample at a first elevated temperature, or in response to a first stimulus, which is, for example, a first voltage producing a first amount of heating in the sample. A second, typically more intense, stimulus is then applied to the reference sample to obtain a third image (which is the second image at elevated temperature). It has been

found that a stimulus producing 5-10% more heating of the sample than the first stimulus is suitable. For each of the two different step-function stimuli, it was found that equal application times (e.g., for four minutes) produced substantially complete heating and was advantageous. Regardless of whether the two stimuli application times are equal, the application times for like-value stimuli must be the same as between the test and reference sample. Step 11 can be repeated for at least a second reference sample, unless one has some highly standardized previously tested samples of known good quality.

In step 12, the initial analysis steps characteristic of TRA are performed upon the sets of reference data, for each reference sample, the acquisition of which data was just described. Step 12 makes a first difference record B from the ambient temperature thermograph and one of the elevated temperature thermographs, and a second difference record D from the elevated temperature thermographs. In step 13, procedures as in steps 11 and 12 are repeated for the test sample replacing the reference sample. Before any ratios are taken, preliminary image processing steps are performed as indicated in step 14, if desired, as discussed below. As shown in FIG. 2, ratio analysis is then performed as shown in step 15, according to any one of the alternate formulas. In the first formula, "B" and "C" can be interchanged because division is commutative. Each ratio of step 15 for all the data points in each of two of the four difference records corresponds to a point in the sample. Since the TRA has proved to be a superior "normalizing" technique for thermography, it is feasible to do a quick "sanity" check in step 15, for example, by comparing ratio images for supposedly very similar "reference samples". Any markedly dissimilar results of the comparison will point to a failure to follow the proper testing technique, or failure to have obtained suitable reference test units.

Proper testing technique may require the following:  
No air drafts except perhaps controlled air flow to maintain ambient temperature.

No heat sources near by (including the sample's own power supply).

Blow off with air jet to stabilize thermally. handling.  
Pre-test staging location should TRA fixture to provide natural thermal equalization to actual test ambient conditions. This reduces the stabilization time achieved by means of the air jet.

Tape critical reflective points (being careful to prevent electrostatic defect generation upon later removal of the tape). It should be remembered the technique depends upon infrared radiation from the sample, and reflections are not desired. It is not required to so treat component leads.

Edge connectors typically used with semiconductor circuits should be thermally maintained at ambient to counteract warming from sample.

Avoid areas that experience large thermal shifts from air conditioning or sun-lit windows.

Block reflections from surrounding surfaces and bodies using baffles of low thermal mass and high emissivity.

Seek viewing angle that prevents the imager or detector from seeing itself in reflections from module. (This goal implies longer viewing distance and a small tilt of the sample relative to the sensor).

In some instances, would-be reference samples thought to be normal or non-defective are found not to be, and must be replaced.

Notice that the first formula, the fundamental formula, involves two ratios derived from the difference records in an ordered way, as may be seen by reference to FIG. 12, which ratio records are then further respectively subjected to the taking of ratios, point by point. The composite record then at each point comprises a ratio of ratios.

The first direct indication of deviation between the reference sample and the test sample can be obtained from the composite record of step 15, according to step 17. In many cases no further testing is necessary; and the procedures of step 16 may be skipped. An immediate decision can be made as to whether the test sample is sufficiently similar to the reference sample. In fact, step 17 can be performed automatically, by testing whether the composite record is featureless in respect of having no variations from the background which exceed a statistical limit such as a multiple of the standard deviation. The indication is then that there is no defect.

If an undesirable level of ambiguity persists after step 15 is performed, i.e., if a suspected defect produces differences from an image for the reference sample which do not exceed a first predetermined level ("three-sigma" level), but are still above a second, lower, predetermined level ("sigma" level), various image enhancement techniques can be employed, particularly with respect to the thermal ratio image for the test sample. In such techniques, the thermal ratio data is organized in the same two-dimensional way as in the original thermograph and, for example, can be viewed on the computer monitor. These are the optional post-ratio-analysis image processing steps shown in step 16.

For example, in step 16, or as shown in FIG. 4, optional noise filtering is done. If the results are insufficient to reduce the level of ambiguity to make a decision possible, step 20 then removes by masking techniques any known non-defect-type artifacts found in either of both of the reference sample and the test sample. This is a specific example of techniques which are known in astronomy and reconnaissance photography as image enhancement techniques.

For further examples of possibly relevant enhancement techniques, see *Digital Image Processing*, by R. Gonzalez et al., Addison-Wesley (1987), pp. 162-163 (median filtering, pertaining to noise filtering); pp. 158-160 (local enhancement, pertaining to mask generation from original image data). As duly enhanced, the thermal ratio images are re-compared in step 17; and a decision is made as to the test sample, e.g., whether the first predetermined level or amount ("three-sigma" level) is exceeded at any point. The test apparatus and technique are ready to be applied to the next test samples, e.g., those coming down an assembly line for semiconductor integrated circuits, as indicated generally at step 18.

FIG. 3 shows the detailed steps in a portion of the procedure of FIGS. 1 and 2, as applied to a current-consuming product, and illustrates specific implementation of some of the points of good testing practice listed above. Of particular note in the detailed steps of FIG. 3, which are partially repetitive of those of FIGS. 1 and 2 is that the first and second elevated-temperature thermographs can be produced, in the case of the typical electronic component, by the application of voltages, close to normal operating voltages, which can be used

for operating performance tests. For example, the successive thermal stimuli might be provided by 95% of normal operating voltage and 105% of normal operating voltage, as illustrated by steps 34, 36, 38 and 440. This versatility of the method is greatly facilitated by its wide dynamic range, which also signifies that these are not critical values of stimuli.

FIG. 4 consists of diagrams that deal with certain aspects of image enhancement, particularly noise filtering. Steps 50-52 relate to a relative smoothing between adjacent pixels of each thermal ratio image and for the resulting comparative image that will tend to filter speckle noise.

FIG. 5 shows yet another aspect of image enhancement that can be performed, per steps 61-63, with one or more of the original elevated temperature thermographs and is useful for generating one or more mask images for spatial filtering.

FIG. 6 shows the interrelationships among the items of equipment used in TRA.

The thermogram data-gatherer 91 is configured to hold a sample 96 from which infrared data is to be acquired. The data is acquired by the infrared sensor 97, that has typically a single, fixed discrete sensing element, which effectively samples or scans the exposed portion of sample 96 via an interposed scanning apparatus in sensor 97. In the preferred embodiment, the infrared sensor 97 is a thermo-tracer, for example, a MIKRON 6T62 thermo-tracer.

Alternatively, sensor 97 could be a semiconductor chargecoupled-device camera, thereby avoiding the electro-mechanical scanner of the MIKRON 6T62 thermo-tracer. The sequencing of image-type data points is then obtained purely electronically, for example, as is typically provided for such a camera.

The thermal ratio logic and storage unit 92 is basically a central processing unit which in addition to performing the calculations indicated above, coordinates the functioning of the image enhancement means 93, the decision circuit 94, as well as the timing through duration control and size, through peak control 98, of thermal stimuli applied from stimulus source 95 to sample 96, and the scanning of the sensor 97. Thus, the logic and storage means 92 obtains the various difference records, as well as the reference sample ratio image and the test sample ratio image. Image enhancement means 93 can use any of the above-described filtering, smoothing and other image enhancement techniques, as well as any of those known in the prior art. Indeed, again as described above, as well as performing in the position shown, image enhancement can act directly on thermographs before entering logic and storage unit 92, as well as on difference records obtained therein. Thus, the arrangement of FIG. 6 is merely illustrative.

Decision circuit 94 accepts or rejects test samples as having no defect or a defect of sufficient magnitude based upon the statistical analysis of the composite record, which for example, may show one more pixels deviating from the surrounding background by one or more standard deviations.

It should be understood that TRA is more broadly applicable to products than just semiconductor circuits or even electronic assemblies. All manufactured products (non-living) can be caused to experience controlled temperature excursions. While use on an assembly line may be a preferred use, it can also be used at any time in the life of a product, provided data, even archived data, from a reference sample of the product is available.

Additional advantages and modifications will readily occur to those skilled in the art. Therefore, the invention in its broader aspects is not limited to the specific details, representative devices, and illustrative examples shown and described. Accordingly, departures may be made from such details without departing from the spirit or scope of the general inventive concept as defined by the appended claims and their equivalents.

What is claimed is:

1. A method of detecting defects in a test sample of a product, comprising the steps of:

generating a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:

(1) making an ambient-temperature thermal record of the reference sample at ambient temperature;

(2) making a plurality of elevated temperature thermal records of the reference sample at a plurality of respective elevated temperatures, including applying a respective thermal stimulus to the reference sample, and

(3) making a first difference record for the reference sample from the ambient-temperature thermal records and one of the plurality of elevated temperature thermal records and at least a second difference record for the reference sample involving at least another of the plurality of elevated temperature thermal records,

generating first and at least second difference records for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample;

deriving at least one ratio record from the difference records for the reference sample and the test sample;

forming a composite record including at least the derived one ratio record; and

generating a defect indication when the composite record yields a statistical significant deviation from an expected value.

2. The method of detecting a defect according to claim 1, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermal records include employing computerized control of the temperature.

3. The method of detecting a defect according to claim 1, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermal records include allowing the passage of a fixed interval of time while each stimulus is applied.

4. The method of detecting a defect according to claim 1, in which the sub-step of making an ambient-temperature thermal record comprises stabilizing the thermal state of the sample by rapidly flowing gas from a compressed gas source around the sample at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

5. The method of detecting a defect according to claim 1, in which the sub-step of applying a respective thermal stimulus to the sample comprises employing the stimulus for a respective period of time different from a period of time for another respective thermal stimulus.

6. The method of detecting a defect according to claim 5, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermal records include employing computerized control of each respective period of time.

7. The method of detecting a defect according to claim 5, in which the sub-steps of making a plurality of

elevated temperature thermal records include allowing some temperature stabilization after an elevated temperature is reached.

8. The method of detecting a defect according to claim 4, in which the sub-step of stabilizing a sample at ambient temperature comprises rapidly flowing gas from a compressed gas source around it at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

9. A method of detecting a defect in a test sample of a product, comprising the steps of:

establishing a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:

(1) making a base thermal record of the reference sample at a base value of a thermal stimulus;

(2) making a plurality of changed value thermal records of the reference sample at a plurality of respective changed values of the thermal stimulus, including applying a respective changed-value thermal stimulus to the reference sample; and

(3) making a first difference record for the reference sample from the base-value thermal record and one of the plurality of elevated value thermal records and a second difference record for the reference sample involving at least another of the plurality of elevated value thermal records;

generating first and second difference records for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with test sample replacing the reference sample;

deriving at least one ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the reference sample and the first and second difference records for the test sample;

generating a defect indication when the composite ratio record yields a statistically significant deviation from an expected value.

10. The method of detecting a defect according to claim 9, in which the sub-step of making a plurality of changed value thermal records include employing computerized control of the value of the stimulus.

11. The method of detecting a defect according to claim 9, in which the sub-step of making a plurality of changed value thermal records include allowing some stabilization period after the stimulus is first applied.

12. The method of detecting a defect according to claim 9, in which the sub-step of making a base thermal record comprises stabilizing the sample by rapidly flowing gas from a compressed gas source around the sample at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

13. A method of detecting a defect in a test sample of a product, comprising the steps of:

establishing a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:

(1) making an ambient-temperature thermal record of the reference sample at ambient temperature,

(2) making a plurality of elevated temperature thermal records of the reference sample at a plurality of respective voltages applied to the sample to produce heating therein, including applying a respective voltage to the reference sample;

(3) making a first difference record from the ambient-temperature thermal records and one of the plurality of elevated temperature thermal records and a second difference record involving at least another of the plurality of elevated temperature;

generating a test record for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample;  
 (4) deriving at least one ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the test sample and the first and second difference records for the reference sample;  
 forming a composite record including the at least one ratio record; and  
 generating a defect indication when the composite record yields a statistically significant deviation from an expected value.

14. The method of detecting a defect according to claim 13, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermal records include employing computerized control of the voltage.

15. The method of detecting a defect according to claim 13, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermal records include allowing a period temperature stabilization after a respective voltage is first applied.

16. The method of detecting a defect according to claim 13, in which the sub-step of making an ambient-temperature thermal record comprises stabilizing the sample at ambient temperature by rapidly flowing gas from a compressed gas source around it at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

17. A system for thermally detecting a defect in a test sample of a product, comprising

means for recording infrared data of a reference sample that does not have defects at ambient and elevated temperatures and for recording infrared data of the test sample at ambient and elevated temperatures;

means for forming a reference sample difference record from the infrared data of the reference sample at the ambient and elevated temperatures, and for forming a test sample difference record from the infrared data of the test sample at the ambient and elevated temperatures;

means for deriving at least one ratio from two of four difference records comprising said reference sample and test sample difference records;

means for converting the ratio into a composite record involving all the difference records; and

means for generating a defect indication when the composite record yields a statistically significant deviation from an expected value.

18. The system of claim 17, further comprising means for enhancing the ratio record to remove potentially false defect indications.

19. The system of claim 18 further comprising means for removing speckle noise from the ratio record.

20. The system of claim 19 further comprising means for preprocessing the thermal records, or the difference records, prior to deriving the ratio record.

21. A method of detecting defects in a test sample of a product, comprising the steps of:

generating a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:

(1) making an ambient-temperature thermograph of the reference sample at ambient temperature;

(2) making a plurality of elevated temperature thermographs of the reference sample at a plurality of respective elevated temperatures, including apply-

ing a respective thermal stimulus to the reference sample, and

(3) making a first difference record for the reference sample from the ambient-temperature thermograph and one of the plurality of elevated temperature thermographs and a second difference record for the reference sample involving at least another of the plurality of elevated temperature thermographs, the first and second difference records each comprising a plurality of image-type data points in an image-related array,

generating first and second difference records for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample;

deriving at least one second ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the reference sample and the first and second difference records for the test sample, the ratio record including data points corresponding to respective data points in at least one of the difference records;

generating a defect indication when the composite record has at least one discrete region of substantially greater than average contrast with respect to surrounding regions.

22. The method of detecting a defect according to claim 21, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include employing computerized control of the thermal stimulus.

23. The method of detecting a defect according to claim 21, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include allowing the passage of a fixed interval of time while each stimulus is applied.

24. The method of detecting a defect according to claim 21, in which the sub-step of making an ambient-temperature thermograph comprises stabilizing the thermal state of the sample by rapidly flowing gas from a compressed gas source around the sample at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

25. The method of detecting a defect according to claim 21, in which the sub-step of applying a respective thermal stimulus to the sample comprises employing the stimulus for a respective period of time difference from a period of time for another respective thermal stimulus.

26. The method of detecting a defect according to claim 25, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include employing computerized control of each respective period of time.

27. The method of detecting a defect according to claim 25, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include allowing some temperature stabilization after an elevated temperature is reached.

28. The method of detecting a defect according to claim 24, in which the sub-step of stabilizing a sample at ambient temperature comprises rapidly flowing gas from a compressed gas source around it at an effective temperature substantially equal to ambient temperature.

29. A method of detecting a defect in a test sample of a product, comprising the steps of:

establishing a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:

(1) making a base thermograph of the reference sample at a base value of a thermal stimulus;

- (2) making a plurality of changed value thermographs of the reference sample at a plurality of respective changed values of the thermal stimulus, including applying a respective changed-value thermal stimulus to the reference sample; and
- (3) making a first difference record for the reference sample from the base-value thermograph and one of the plurality of elevated value thermographs and a second difference record for the reference sample involving at least another of the plurality of elevated value thermographs, the first and second difference records each comprising a plurality of image-type data points in an image-related array; generating first and second difference records for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample; deriving at least one ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the reference sample and the first and second difference records for the test sample, the ratio record including data points corresponding to the respective data points in at least one of the difference records; forming a composite record including at least the one derived ratio record; and generating a defect indication when the composite record has at least one discrete region of substantially greater than average contrast with respect to surrounding regions.
30. The method of detecting a defect according to claim 29, in which the sub-step of making a plurality of changed value thermographs include employing computerized control of the value of the stimulus.
31. The method of detecting a defect according to claim 29, in which the sub-step of making a plurality of changed value thermographs include allowing some stabilization period after the stimulus is first applied.
32. The method of detecting a defect according to claim 29, in which the sub-step of making a base thermograph comprises stabilizing the sample by rapidly flowing gas from a compressed gas source around the sample at an effective temperature not exceeding ambient temperature.
33. A method of detecting a defect in a test sample of a product, comprising the steps of:  
establishing a reference record for at least one reference sample of the product that does not have defects, comprising the sub-steps of:
- (1) making an ambient-temperature thermograph of the reference sample at ambient temperature,
  - (2) making a plurality of elevated temperature thermographs of the reference sample at a plurality of respective voltages applied to the sample to produce heating therein, including applying a respective voltage to the reference sample;
  - (3) making a first difference record from the ambient-temperature thermographs and one of the plurality of elevated temperature thermographs and a second difference record involving at least another of the plurality of elevated temperature thermographs, the first and second difference records each comprising a plurality of image-type data points in an image-related array;

- generating a test record for the test sample by repeating sub-steps (1)-(3) with the test sample replacing the reference sample;
- (4) deriving at least one ratio record from the four difference records consisting of the first and second difference records for the test sample and the first and second difference records for the reference sample, the ratio record including data points corresponding to respective data points in at least one of the difference records;
- forming a composite record including the at least one ratio record; and
- generating a defect indication when the composite record has at least one discrete region of substantially greater than average contrast with respect to surrounding regions.
34. The method of detecting a defect according to claim 33, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include employing computerized control of the voltage.
35. The method of detecting a defect according to claim 33, in which the sub-steps of making a plurality of elevated temperature thermographs include allowing a period temperature stabilization after a respective voltage is first applied.
36. The method of detecting a defect according to claim 33, in which the sub-step of making an ambient-temperature thermograph comprises stabilizing the sample at ambient temperature by rapidly flowing gas from a compressed gas source around it at an effective temperature not exceeding ambient temperature.
37. A system for thermally detecting a defect in a test sample of a product, comprising  
means for forming infrared images of a reference sample that does not have defects at ambient and elevated temperatures and for forming infrared images of the test sample at ambient and elevated temperatures, each of the images comprising a plurality of image data points;  
means for forming reference sample difference records from the images of the reference sample at the ambient and elevated temperatures, and for forming test sample difference records from the images of the test sample at the ambient and elevated temperatures;  
means for forming at least one ratio record from two of four difference records comprising said reference sample difference records and test sample difference records;  
means for converting the ratio record into a composite record involving all the difference records; and  
means for generating a defect indication when the composite record has at least one discrete region of substantially greater than average contrast with respect to surrounding regions.
38. The system of claim 37, further comprising means for enhancing the ratio record to remove potentially false defect indications.
39. The system of claim 38 further comprising means for removing speckle noise from the ratio record.
40. The system of claim 38 further comprising means for preprocessing the thermographs, or the difference records, prior to deriving the ratio record.
- \* \* \* \* \*